

М.Е. РЕЗНИКОВ

**АВИАЦИОННЫЕ ТОПЛИВА  
И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
(АВИАЦИОННАЯ ХИММОТОЛОГИЯ)**

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИИ

МОСКВА  
2003

М.Е. РЕЗНИКОВ

**АВИАЦИОННЫЕ ТОПЛИВА  
И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
(АВИАЦИОННАЯ ХИММОТОЛОГИЯ)**

ПОД РЕДАКЦИЕЙ А.Г. КРУТИЛИНА

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИИ

МОСКВА  
2003

В книге излагаются основы авиационной химмотологии – теории и технологии применения ГСМ (топлив, масел, смазок и специальных жидкостей) при эксплуатации летательных аппаратов. Рассматриваются сорта и свойства ГСМ, их влияние на эффективность и надежность авиационной техники. Содержатся краткие сведения из руководящих и нормативно-технических документов, которые регламентируют порядок применения и обеспечения качества ГСМ, используемых в летательных аппаратах и средствах их наземного обслуживания.

Назначение книги в качестве учебника для слушателей и курсантов инженерных вузов ВВС обеспечено соответствием ее объема, содержания и научного уровня учебной программе дисциплины "Авиационные топлива и смазочные материалы", многолетним опытом ее преподавания в Военно-воздушной инженерной академии им. проф. Н.Е.Жуковского и многочисленными научными работами. Книга рассчитана на обеспечение специальной подготовки и использование в служебной деятельности инженерно-технического состава военной авиации, а также при военной подготовке студентов гражданских вузов. Она может быть полезной для летно-командного состава, офицеров авиационного тыла, специалистов гражданской авиации и промышленности, обеспечивающих эксплуатацию авиационной техники.

Иллюстраций – 70, таблиц – 17, библиография – 36

## Предисловие

В данной книге авиационные ГСМ\* рассматриваются не как расходные материалы, а как неотъемлемая составная часть единой системы *авиационная техника – ГСМ – эксплуатация*. Авиационные топлива служат источником тепловой энергии и участвуют в образовании рабочего тела двигателя, необходимых для создания тяги силовой установки и осуществления полета летательного аппарата. Смазочные материалы уменьшают трение и износ в двигателях, механизмах и других устройствах ЛА, обеспечивают их длительную работоспособность. Специальные (технические) жидкости применяются в бортовых системах управления и защиты ЛА, функционирование которых основано на использовании их специфических свойств.

Знание инженерно-техническим составом авиации сортов, свойств и порядка применения авиационных ГСМ необходимо для обеспечения штатной эксплуатации летательных аппаратов и принятия правильных решений в нештатных ситуациях. В авиации от этого зависит не только выполнение полетного задания, но и жизнь людей.

Нельзя упрощенно рассматривать ГСМ только в плане хранения, учета, транспортирования, заправки летательных аппаратов. Значение авиационных ГСМ состоит прежде всего в их органической связи с устройством и особенностями силовой установки и ЛА в целом, вследствие чего их свойства влияют на летно-технические показатели и эксплуатационные характеристики авиационной техники, на ее боевую живучесть, надежность и долговечность. От них в конечном счете зависит боеготовность и боеспособность авиации, решение связанных с ее применением экономических и экологических проблем.

Главным фактором в применении ГСМ является их качество, а не количество, потому что отказы авиационной техники и авиационные происшествия, вызываемые несоответствующим качеством ГСМ, приносят ущерб, многократно превышающий стоимость самих ГСМ.

Количественный фактор проявляется не столько в обращении с ГСМ, как многотоннажным и многономенклатурным расходным имуществом, сколько в умножении – соответственно масштабам потребления ГСМ – того положительного или отрицательного эффекта, который обусловлен взаимосвязью авиационной техники и качества ГСМ.

Взаимное влияние свойств ГСМ, устройства и эксплуатации техники изучает *химмотология* (от слов *химия* и *мотор*) – прикладная теория рационального применения ГСМ. Формирование этой новой научной дисциплины обязано творчеству ученых нашей страны, раскрывших и систематизировавших закономерные связи между ГСМ и техникой, для которых они предназначены, прежде всего – двигателями.

В настоящем учебнике изложены в минимальном объеме, необходимом для инженеров-механиков военной авиации, основы *авиационной химмотологии* применительно к ГСМ, которые используются непосредственно в ЛА, а

---

\* Вместо перечисления терминов *топлива, масла, смазки и специальные жидкости* применяется аббревиатура (сокращенное обозначение) *ГСМ*, производная от нестрогого обиходного термина *горюче-смазочные материалы*.

также ГСМ для технических средств наземного обслуживания полетов. Материал учебника опирается на теорию и экспериментальные исследования физико-химических процессов в элементах двигателей, механизмов, бортовых и обслуживающих систем ЛА, на практический опыт применения ГСМ. Он соответствует руководящим и нормативно-техническим документам, регламентирующим порядок применения, обеспечения качества и испытания ГСМ. Проанализированы химмотологические связи, позволяющие лучше понять процессы и явления, которые приводят к отказам авиационной техники и авиационным происшествиям, и определить пути и конкретные меры их предотвращения.

В первой главе учебника даны общие положения авиационной химмотологии, касающиеся всех видов авиационных ГСМ. Большая часть последующих глав посвящена физико-химическим и эксплуатационным свойствам каждого из видов ГСМ в отдельности – топливам, маслам, смазкам, техническим жидкостям, в том числе особенностям различных сортов ГСМ. Отдельные главы содержат краткие сведения о криогенных топливах, которые в перспективе способны заменить традиционные нефтяные топлива, и о ракетных топливах. Учебник содержит две теоретические главы: главу об энергетике и физике горения топлив, предшествующую основному материалу по топливам, и главу о трении и износе, поясняющую сущность антифрикционного действия смазочных материалов. В заключительной главе изложены организационно-технические вопросы обеспечения и контроля качества ГСМ. В конце учебника приведены справочные сведения, главным образом – нормы качества ГСМ из государственных стандартов и технических условий.

Автор выражает признательность старшему преподавателю ВВИА В.В.Разносчикову за тщательную подготовку справочного материала и активное обсуждение содержания рукописи в процессе ее подготовки, сотрудникам ВВИА Р.В. Ефремову и С.М. Захаровой за ее оформление, старшему научному сотруднику 13 ГНИИ МО РФ С.А. Гущину за помощь в подборе информации и замечания, сделанные при просмотре рукописи, профессору ВВИА Г.К. Старостенко и начальнику отдела 25 ГосНИИ МО РФ (по химмотологии) А.В.Исаеву за полезные советы и замечания, сделанные ими при рецензировании учебника, и особую благодарность начальнику 13 ГНИИ МО РФ А.Г. Крутилину, взявшего на себя труд по редактированию учебника.

## Глава 1

### ВВЕДЕНИЕ В АВИАЦИОННУЮ ХИММОТОЛОГИЮ

#### 1.1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ХИММОТОЛОГИИ

**1.1.1. Что такое химмотология.** Термин *химмотология* (химия + мотор + "логия" от греческого *logos* – понятие, учение) принят для наименования науки о свойствах, качестве и рациональном применении ГСМ в технике. Его предложил выдающийся советский ученый в области ГСМ профессор К.К. Папок [21].

Химмотология как самостоятельная отрасль науки и техники сформировалась на стыке ряда химических и технических наук, химии и технологии топлив и масел, эксплуатации различных технических, главным образом, транспортных средств. Она сложилась и развивается на основе выявления и исследования связей химического состава и свойств ГСМ с конструкцией, рабочим процессом и эксплуатацией двигателей и других технических устройств.

Необходимость выделения этого научно-технического направления в качестве самостоятельной отрасли знаний назрела в середине прошлого века (в 40-60-тые годы) в связи с увеличением масштабов производства и применения ГСМ и усилением зависимости новой техники, отличающейся высокими параметрами, от свойств ГСМ. Рождение новой науки именно в нашей стране обязано тому, что ее экономика базируется на собственных топливно-энергетических ресурсах в отличие от других крупных промышленных государств.

**1.1.2. Примеры острых химмотологических проблем в военной авиации.** Во время Великой Отечественной войны поставленный по ленд-лизу (то есть взаймы) из США 100-октановый бензин детонировал в моторах ИЛов, МиГов и ЯКов, которые работали нормально на бакинском 95-октановом бензине. И только на основе научного анализа взаимосвязи химических и моторных факторов советские ученые и инженеры выявили причину этого парадокса, предложили способ доработки американского бензина и обеспечили возможность его использования.

Другой эпизод войны, тяжелый по своим последствиям – большим боевым потерям (сентябрь 1944 года): запрет использовать авиацию из-за опасения детонации двигателей в операции по взятию предместья Варшавы – Праги. Доставленный для обеспечения операции фактически кондиционный (как выяснилось впоследствии) авиабензин был забракован из-за неумелого, неквалифицированного проведения контроля его качества.

Становление и развитие реактивной авиации породило множество химмотологических проблем, обусловленных неизученными сочетаниями особенностей новых топлив и новых двигателей. Некоторые из них хотя и не имели катастрофических последствий, но существенно снижали боеготовность авиации. Так, неожиданными оказались массовые отказы двигателей вследствие забивки кристаллами льда топливного фильтра перед насосом (см. 3.3.5). Парадоксальным, на первый взгляд, казалось обнаруженное на большом числе самолетов группы советских войск в Германии повреждение наклонной шайбы топливного насоса – износ в виде канавок. Его причиной оказалась слишком глубокая

очистка авиакеросина немецкого производства, повлекшая удаление примесей, обладающих смазочным действием.

Ряд химмотологических проблем напрямую приводил к катастрофическим последствиям, гибели летного состава. Вопиющий пример – падение двух самолетов Ту-16 в Балтийское море из-за отказа регулятора частоты вращения ротора двигателей. Причина отказа – избыточное (всего лишь на 0,002%!) содержание меркаптановой серы в реактивном топливе, допущенное ответственными должностными лицами ради, казалось бы, благой цели – выполнения плана учебно-боевой подготовки в условиях дефицита топлива. Разумеется, не все, но многие химмотологические нормативы, правила, положения написаны человеческой кровью.

**1.1.3. Чем занимается химмотология.** Профессор К.К. Папок дал характеристику химмотологии, как самостоятельной науки, которая:

- изучает физико-химические и эксплуатационные свойства топлив, масел, смазок, специальных жидкостей и процессы, протекающие в них при работе двигателей внутреннего сгорания, машин и механизмов, а также в условиях хранения, перекачек и транспортирования;

- устанавливает закономерности, связывающие качество ГСМ с показателями работы двигателей и машин;

- разрабатывает вопросы повышения надежности, долговечности и экономичности работы двигателей, машин и механизмов в связи с улучшением качества ГСМ и их рациональным использованием [20].

В дальнейшем предметом химмотологии стали также вопросы экономики производства и экологии применения ГСМ. Важное место в химмотологии заняла разработка системы и методов оценки качества ГСМ [28].

**1.1.4. Химмотологические связи.** В каждой науке есть своя специфика постановки и решения относящихся к ней вопросов. В химмотологии это – научный и инженерный анализ диалектических связей, складывающихся между техникой и применяемыми ГСМ в условиях эксплуатации, а также на более ранних этапах разработки и испытаний новой техники и новых ГСМ (см. рис.3.2, 5.2,7.1 и 10.1, где связи сгруппированы по узлам и агрегатам двигателей, в которых проявляется их влияние).

Химмотологические связи в силовых установках и бортовых системах ЛА проявляются в виде влияния на происходящие в них процессы и явления, на рабочие режимы и зависящие от них тактико-технические данные ЛА, на характер и объем работ при их обслуживании, на показатели надежности, безопасности и живучести боевых авиационных комплексов. Они могут иметь форму требований тактико-технического или экономического характера.

Химмотологические связи, осуществляемые как условия работы или в виде влияний, имеют объективный характер, а выражаемые в форме требований – субъективные предпосылки. Они определяются уровнем понимания химмотологических проблем специалистами, целенаправленностью их практических действий.



**1.1.5. Роль химмотологических факторов в боевом авиационном комплексе.** Схема, поясняющая влияние различных факторов, связанных с ГСМ, на выполнение боевым авиационным комплексом боевого задания представлена на рис. 1.1. На пути обеспечения и использования ГСМ возможны воздействия, связанные с ГСМ, которые нарушают или затрудняют функционирование боевого авиационного комплекса. Цифровые обозначения воздействий, обусловленных химмотологическими факторами, помечены звездочкой. Они превалируют, число других возможных воздействий меньше. Соответственно помечены цифровые обозначения сведений по ГСМ.

1 – перебои в снабжении из-за нехватки ГСМ или транспортных затруднений; 2 – перебои в снабжении в результате действий противника; 3 – неисправности складской и заправочной техники; 4\* – обнаружение некондиционности ГСМ при контроле их качества; 5\* – обнаружение непригодности ГСМ при проверке их марок и чистоты; 6\*, 7\* – обнаружение отказов и неисправностей техники из-за низкого качества, загрязнения или неправильного применения ГСМ; 8\* – влияние взрывопожароопасности ГСМ на уязвимость ЛА; 9\* – влияние топлива на дымление, повышающее заметность и вероятность поражения ЛА; 10\* – влияние топлива на электризацию ЛА, повышающую вероятность поражения грозовыми разрядами; 11 – данные о сортах (марках) и количестве ГСМ; 12 – информация в случае 1, 2, 3; 13 – информация в случае 4\*; 14\* – данные о влиянии ГСМ на ограничения летно-технических характеристик ЛА; 15\* – информация в случае 5\*, 6\*; 16\* – указания, связанные с влиянием ГСМ на ограничения летно-технических характеристик; 17\* – информация в случае 7\*, 8\*, 9\*, 10\*.

**1.1.6. Задачи авиационной химмотологии.** Авиационная химмотология, как теория и технология применения ГСМ в ЛА, должна в современных условиях способствовать сохранению боеготовности располагаемого парка ЛА, продлению ресурса имеющейся авиационной техники и вооружения. Для этого необходимо на основе химмотологических исследований и системного анализа обеспечить глубокое понимание тех процессов и явлений в силовых установках, бортовых системах, агрегатах и оборудовании ЛА, которые зависят от применяемых ГСМ или оказывают на них воздействие, в том числе в специфических условиях нерегулярной эксплуатации техники. При этом целесообразно использовать по возможности более дешевые сорта ГСМ за счет приспособления к ним авиационной техники, совершенствования ее эксплуатации и технического обслуживания.

Одновременно, работая на перспективу развития авиационной техники, включая создание принципиально новых ее объектов (гиперзвуковых ЛА, воздушно-космических и детонационных двигателей), необходимо разрабатывать новые все более эффективные ГСМ, отвечающие требованиям новой техники. К ним относятся криогенные топлива (см. гл. 4) – жидкий водород, жидкий метан (практически – сжиженный природный газ). Задача отработки технологии применения СПГ нацелена не только на повышение показателей техники, но и на перспективу массовой замены авиакеросина из-за усиливающегося его дефицита и возрастания цены, а также для уменьшения загрязнения окружающей среды.



При наличии давно отработанных методов и комплексов методов химмотологических испытаний авиационных ГСМ, применяемых в настоящее время, к числу важнейших задач авиационной химмотологии следует отнести разработку и освоение таких новых методов, которые моделируют процессы, явления и условия, связанные с перечисленными выше особенностями использования старой и создания новой авиационной техники.

## 1.2. АВИАЦИОННАЯ ХИММОТОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

**1.2.1. Назначение химмотологической системы.** Совокупность химмотологических связей представляет собой *химмотологическую систему*, в которой определяются закономерности, характеризующие влияние ГСМ на безотказность, долговечность и экономичность техники, а во многих случаях – и на ее основные потребительские свойства (для военной техники – на тактико-технические показатели), на сроки и масштабы внедрения, на экологическую обстановку, а также на характер и объем работ при обслуживании техники.

Нельзя рассчитывать на удовлетворительный уровень случайно сложившихся химмотологических систем. Так, например, по данным, относящимся к такой промышленно-развитой стране, как Англия, потреблявшей в конце 60-х г.г. – в период становления химмотологии и трибологии (науке о трении и износе) 1 млн. т смазочных материалов ежегодно, потери из-за их нерационального использования были на порядок больше стоимости самих масел [21].

Только целенаправленное изучение химмотологических связей, разработка конкретных предложений по оптимизации химмотологической системы и реализация соответствующих рекомендаций могут обеспечить их высокую эффективность.

**1.2.2. Структура системы.** Применительно к боевым авиационным комплексам, а также тренажерной, коммерческой и специальной авиации химмотологические связи сводятся в трехзвенную *химмотологическую систему* (рис.1.2) [15]. Первое ее звено – ЛА – *летательные аппараты* (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты) как совокупность двигателя и связанных с ним других элементов силовой установки, бортовых систем, агрегатов и оборудования, конструкция, режим и условия работы которых зависят от ГСМ или влияют на них. Второе звено – ГСМ – *топливо и смазочное масло для двигателя, смазки и специальные технические жидкости для бортовых систем, агрегатов и оборудования ЛА*. Третье звено – ТЭ – *техническая эксплуатация* в широком понимании, включающая эксплуатацию авиационной техники в полете *при выполнении боевых задач БАК*.

При взаимодействии первого и второго звеньев авиационной химмотологической системы – ЛА и ГСМ – проявляются три важные особенности. Первая – это весьма жесткие условия для ГСМ, связанные с тепловой и силовой напряженностью конструкций авиационной техники. Вторая – высокие требования к эффективности ГСМ, поскольку каждый их килограмм, взятый в полет, соответственно снижает полезную нагрузку ЛА. Третья – высокая вероятность катастрофических последствий отказа или неисправности авиационной техники, вызванных низким качеством, неправильным или неумелым применением ГСМ. Последнее заставляет главное внимание обращать на эксплуатационные свойства авиационных ГСМ.

В третьем звене – ТЭ – *выявляется уровень совершенства авиационной химмотологической системы* как в плане влияния ГСМ на боеготовность БАК и безотказность полетов, так и на возможные ограничения при выполнении боевых задач (по радиусу действия, продолжительности полета на максимальных скоростях, поражаемости при использовании противником инфракрасных средств и т.п.).

Общей особенностью всей авиационной химмотологической системы является ее чрезвычайная сложность, обусловленная конструктивным и технологическим обеспечением высоких параметров авиационной техники, большим числом автоматических регулирующих устройств, множеством контрольно-измерительных приборов, резервированием ряда бортовых систем и агрегатов, большим количеством операций наземной подготовки и предполетного контроля, взаимодействием нескольких служб обеспечения полетов.

Взаимодействие между звеньями авиационной химмотологической системы происходит большей частью не посредством двусторонних связей, а через *химмотологические явления и процессы, определяемые совместным влиянием всех звеньев системы*, (узел  $\Sigma$  на рис.1.2). Любое химмотологическое явление (например, выделение твердых осадков при нагреве ГСМ, кристаллизация воды в топливе, фрикционный или коррозионный износ узлов трения, образование дисперсного углерода при горении топлива и т.п.) представляет собой узел - "сток" этих влияний, отражающих роль каждого звена в его возникновении, а в итоге определяющих интенсивность явления. Одновременно это и узел - "исток" воздействия на звенья системы, которое зависит как от интенсивности явления, так и от чувствительности к нему соответствующего звена (но не от вклада этого звена в возникновение явления!).

Следует иметь в виду, что реальное проявление вредных эффектов в химмотологической системе имеет не регулярный, а *вероятностный* характер, особенно отказы, поломки и неисправности, а также характеристики боевой эффективности. Ожидаемое возникновение некоторых из них может выходить за пределы установленного срока службы техники, но при неблагоприятном сочетании ряда факторов, действующих со стороны различных звеньев системы, реально создаются условия для отказа в работе, разрушения двигателя, поражения ЛА в боевых условиях и т.п.

### **1.3. РОЛЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗВЕНЬЕВ ХИММОТОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**1.3.1. Ошибки при использовании ГСМ несоответствующего качества.** Опасность отказа техники, вызываемую неправильным взаимодействием звеньев авиационной химмотологической системы, представляет применение такого реактивного топлива, которое кроме керосина содержит бензиновые фракции с повышенным давлением насыщенного пара. На такое топливо топливная аппаратура наших самолетов не рассчитана. Практически имел место непредвиденный случай попадания в топливную систему наших самолетов топлива JP-4 (смеси керосина и бензина), который используется американскими ВВС при выполнении полетов внутри страны.

Выполнявшие показательные полеты в США самолеты Су-17, то-ли по

безграмотности нашего личного состава, то-ли по соображениям, известным американцам, перед возвращением на Родину были заправлены топливом JP-4. Нерасчетное повышение давления пара в полете на высоте 13000м над знойной пустыней Невада вызвало кавитацию и самовыключение двигателей на двух самолетах и падение их до 3000 м. Только благодаря умелым действиям экипажа двигатели удалось запустить и избежать катастрофы. В узле  $\Sigma$  сплелись недостаточный кавитационный запас (звено 1 – ЛА), высокое давление пара нагретого топлива (звено 2 – ГСМ), потеря высоты самолетов (звено 3 – ТЭ), умелые действия экипажа.

Более нелепый трагический эпизод имел место при проведении испытаний широкофракционного (содержащего бензин) топлива Т-2 на аэродроме Монино. После полета самолета МиГ-17 с соответствующим ограничением режимов топливо Т-2 слито не было и к его остатку добавлен стандартный авиакеросин. В сверхзвуковом полете возникла паровая пробка в нагретом топливе при перекачке его по магистрали из заднего в передний бак. Из-за этого сработал клапан, сигнализирувавший о якобы выработанном топливе заднего бака. Летчик выключил насос перекачки и при посадке с задней центровкой самолет разбился. На неоправданно ранний сигнал о выработке заднего бака руководитель по полетам не обратил внимания.

**1.3.2. Правильный учет плотности топлива.** Существенную роль может иметь плотность топлива при решении взаимосвязанных вопросов дальности полета и загрузки ЛА. Излишняя масса топлива, не требуемая исходя из полетного задания, которая могла быть заправлена вследствие более высокого, чем обычно, значения плотности топлива (в частности, из-за низкой температуры) может оказаться вредной – удлинить разбег, увеличить продолжительность набора высоты в специфических, например, горных условиях.

На самолете с турбовинтовым двигателем установка  $\gamma$ -корректора по паспортному, а не фактическому значению плотности топлива может быть причиной неправильной регулировки расхода топлива в полете, что отражается на взаимодействии всех трех звеньев химмотологической системы через узел  $\Sigma$ .

Разумеется, плотность смазочного материала или специальной жидкости не может сыграть подобной роли, но зато неточность ее определения может быть причиной упущенного сигнала о несоответствии марки ГСМ и связанных с этим последствий.

**1.3.3. Взаимодействие физико-химических процессов в топливе и масле.** При длительном использовании формально кондиционного топлива Т-1, но близкого к предельно допустимым значениям по показателям термостабильности, в топливно-масляном радиаторе одного из двигателей самолета МиГ-21 накопилось более 60 г отложений (это было обнаружено при расследовании предпосылки авиационного происшествия). Увеличенное время выбега турбины после выключения двигателя свидетельствовало о дефектном состоянии подшипников ротора. При осмотре маслофильтра обнаружены улитые отложения, являющиеся признаком перегрева масла МК-8П, а также следы бронзовой стружки, свидетельствующие о начале разрушения сепараторов подшипников после разборки двигателя подтвердилось дефектное состояние промежуточно-

го подшипника. И хотя анализ масла МК-8П подтвердил его кондиционность, по своевременно выявленной совокупности предпосылок авиационного происшествия удалось обнаружить сложную, опасную для всех трех звеньев системы взаимосвязь развивающихся дефектов и предотвратить вероятную катастрофу.

**1.3.4. Необходимость конкретного инженерного анализа проблематических ситуаций.** Роль физико-химических процессов и явлений в обеспечении безотказности техники настолько разнообразна, что необходимо методически правильно, с проявлением глубокой инженерной эрудиции выявить именно те конкретные факторы, которые являются определяющими, гарантируют правильное взаимодействие рабочих элементов и звеньев системы в целом. Это – непростая задача. Например, такое явление, как выделение кристаллов льда в топливе при низкой температуре, может быть связано более чем с 20 факторами, (см. 3.7.2, 3.9.3) и надо понять, какие из них существенны в конкретных условиях. Примерно столько же факторов физико-химической природы могут быть причиной других отказов топливной автоматики и надо своевременно обнаружить и предотвратить влияние тех из них, которое проявляется в данных конкретных условиях.

#### **1.4. ХИММОТОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ**

**1.4.1. Отличительные особенности химмотологических испытаний.** Химмотологические испытания в широком плане представляют собой комплекс экспериментальных работ по оценке работоспособности и эксплуатации техники на предназначенных для нее ГСМ. Главная трудность в их постановке и оценке их результатов заключается в том, что неисправности и отказы в работе техники, не имеющие причинно-следственной связи с ГСМ, проявляются во многих случаях практически так же, как вызываемые несоответствием качества или неправильным применением ГСМ.

Поэтому спецификой химмотологических испытаний является не столько абсолютная, сколько относительная оценка ГСМ. Абсолютная оценка (в плане обеспечения установленных технических показателей и нормативов, отсутствия неисправностей и отказов техники, требуемого срока службы техники) безусловно необходима для решения вопроса о пригодности ГСМ для конкретной техники. Но при обнаружении отклонений требуется относительная оценка путем сравнения с другими образцами ГСМ. Она позволит не приписывать влиянию ГСМ неисправности и отказы, вызванные другими причинами. Для реализации такого подхода создана система и многочисленные методы химмотологических испытаний – лабораторных, стендовых, эксплуатационных, в том числе летных (см. 11.2).

Зачастую химмотологическими испытаниями считают физико-химический анализ ГСМ, который проводится в процессе производства для контроля соблюдения технологии. Однако главный смысл химмотологических испытаний – определение потребительских свойств ГСМ, что далеко выходит за пределы физико-химического анализа. Потребительские свойства ГСМ включают влияние на работоспособность и надежность техники, характеристики в условиях хранения, транспортирования, перекачки, фильтрации, контакта с окружающей средой, токсичность, взрывопожаробезопасность. Влияние многих из них пере-



плетается друг с другом, выделить отдельные свойства при комплексном испытании затруднительно.

Проведение ресурсных стендовых и эксплуатационных испытаний ГСМ требует затраты больших технических и денежных средств, нескольких месяцев, а иногда и лет рабочего времени и, как правило, не дает достаточно четких данных.

**1.4.2. Квалификационные испытания.** Лабораторные и лабораторно-стендовые испытания на модельных установках, натурных агрегатах, специально созданных стендах, имитирующих условия применения ГСМ, позволяют создать систему объективной и всесторонней оценки каждого отдельного эксплуатационного свойства (см. 3.10, 7.10). Методы ускоренных испытаний, моделирующие условия применения ГСМ при ограниченной затрате испытуемых образцов по предложению профессора К.К. Папок, принято называть квалификационными. По существу в полной мере химмотологическими являются именно квалификационные испытания. Раздельное определение, например, для масел, их противоизносных свойств, противозадирных свойств, лакообразования, моющих свойств и др. дают возможность оценки взаимодействия именно ГСМ с элементами других звеньев системы, исключить случайное влияние других элементов. Уверенность в достоверности оценки при этом подкрепляется сравнением оцениваемого образца с прототипом, эталонным образцом, по которому уже достаточно известны интересные эксплуатационные свойства.

**1.4.3. Система химмотологических испытаний.** Различные виды и сорта ГСМ требуют разнообразного подхода и объема их оценки. Созданы не только методы (несколько сотен), но и комплексы методов квалификационной оценки реактивных топлив, топлив поршневых двигателей, смазочных масел и специальных жидкостей различного назначения (всего 30 комплексов для транспортной техники).

Установлен порядок проведения испытаний различного целевого назначения – государственных приемочных, ведомственных и др. Вся система химмотологических испытаний настолько сложна и требует обязательного выполнения, что по ней требуется подготовка квалифицированных специалистов, использование специальной документации и четкие правила ее ведения (см. 11.2.3).

## Глава 2

### ГОРЕНИЕ ТОПЛИВ

#### 2.1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

**2.1.1. Физико-химическая природа горения.** Процесс горения топлива в авиационном двигателе обеспечивает выполнение топливом двух его основных функций – выделение тепловой энергии и образование газообразного рабочего тела, которые необходимы для создания двигателем силы тяги и осуществления полета.

*Горение представляет собой сложную совокупность физико-химических процессов – интенсивной самоускоряющейся экзотермической (то-есть идущей с выделением энергии) химической реакции и возбуждаемых ею процессов тепло- и массообмена.* Вследствие резкого саморазогрева реагирующего вещества возникает его свечение – *пламя*. При сжигании топлива в реальных условиях камеры сгорания двигателя возникает энергично колеблющийся огневой факел сложной структуры.

По химической природе горение топлива, как правило, окислительно-восстановительный процесс. Сущность его на микроуровне состоит в том, что подвижные электроны горючих элементов (водорода, углерода, металлов) переходят к молекулам и ионам элементов-окислителей (кислорода воздуха, окисленного азота в ракетном окислителе и др.) с образованием, в конечном счете, стабильных продуктов горения: водяного пара, диоксида углерода (углекислого газа) и др. Скоротечность химического превращения и тепловыделения при горении порядка миллисекунды и даже меньше, что придает веществу в зоне реакции горения особые свойства: оно сильно разогрето (обычно до температуры порядка 2000-3000 К и выше), химически возбуждено, частично ионизировано и физически является низкотемпературной плазмой.

Интенсивность горения обусловлена его цепным характером. В ходе повторяющихся звеньев цепного химического процесса образуются и размножаются активные частицы – свободные атомы и радикалы (молекулы, лишенные 1-2 электронов). Они втягивают в процесс звено за звеном всю массу исходного вещества, например, углеводородов и кислорода. Пока не израсходован весь исходный горючий материал, реакция поддерживается теплоотдачей от пламени, взаимной диффузией и механическим перемещением исходного вещества, промежуточных и конечных продуктов горения.

**2.1.2. Роль процессов горения.** Овладение процессом горения сыграло огромную роль в становлении и развитии человеческого рода, использование горения человеком явилось важнейшим фактором его отделения от животного мира. Сжигание топлива – главный способ получения энергии в современных силовых установках и отопление помещений. Помимо того, в военном деле горение служит одним из способов прямого воздействия средств поражения на противника. А неуправляемое горение наносит катастрофический ущерб природе, людям, технике.

Научные основы процессов горения и сжигания топлива заложены М.В.Ломоносовым и Д.И. Менделеевым. Важнейший вклад в современную

теорию горения внесли академики М.М. Семенов, Я. Б. Зельдович и их научная школа. Исследованию различных по форме и по назначению процессов горения посвящены тысячи работ ученых всего мира.

Физико-химические механизмы горения крайне сложны и многообразны. Данный учебник содержит лишь весьма краткое, упрощенное изложение принципиальных основ и практического использования процесса горения топлив, необходимых для понимания его реализации в авиационных двигателях.

**2.1.3. Специфика процессов горения.** Общими для различных форм горения важными специфическими чертами являются:

- самоускорение реакции;
- резкое пространственное ограничение (локализация) зоны реакции в каждый момент времени, что позволяет рассматривать ее как поверхность (фронт);
- резкий перепад температур (тепловой скачок) между исходными и конечными продуктами реакции;
- способность к перемещению по объему начальных продуктов, к распространению горения в пространстве;
- четкие границы концентрации, давления, температуры, за пределами которых реакция не идет (наличие критических условий протекания);

В связи со сложностью и многообразием физико-химических механизмов горения их обычно представляют не в форме конкретных химических уравнений, а суммарно, на основе закономерностей химической кинетики, диффузии и теплообмена.

**2.1.4. Взрыв.** Сгорание топлива приобретает характер взрыва, если химическая реакция успевает завершиться, прежде чем ее продукты начнут расширяться и разбрасывать непрореагировавшие частицы вещества. Это имеет место при очень высокой химической активности вещества, а также в замкнутом пространстве, ограничивающем расширение, когда ускорению реакции способствует резкое повышение давления.

Продолжительность химического превращения при нормальном горении (*дефлаграции*) порядка  $10^{-3}$  с, а взрывчатого превращения – порядка  $10^{-5}$  с.

## **2.2. ЭНЕРГЕТИКА ГОРЕНИЯ**

**2.2.1. Превращения энергии при горении.** В исходной химической системе – топливе при горении разрушаются внутримолекулярные химические связи, сначала в результате внешнего воздействия (зажигания, начального импульса), сообщаемого веществу достаточную для этого энергию, а затем за счет энергии, которая выделяется при образовании более прочных химических связей в молекулах продуктов сгорания. Разность между энергией, освобождаемой при возникновении новых связей, и затраченной на разрыв исходных связей в молекулах топлива, идет на увеличение скорости молекул – их беспорядочного движения (тепловая форма). При взрыве и детонационном горении (см. 2.5) часть освободившейся энергии идет на увеличение скорости не беспорядочного, а направленного движения (механическая форма).

**2.2.2. Теплотворность, ее экспериментальное определение.** Величина выделяемой энергии соответствует тепловому эффекту реакции горения, кото-



рому по правилам термодинамики приписывается знак минус, поскольку эта энергия выводится из реагирующей системы. Однако в техническом аспекте целесообразно эту энергию выражать положительной величиной, то есть с обратным знаком, поскольку она сообщается рабочему телу двигателя. Для топлива в расчете на единицу массы горючего вещества (например, керосина) она представляет собой ту теплоту сгорания (теплотворность), которая обеспечивает рабочий процесс двигателя.

Теплотворность топлива определяют опытным путем с помощью калориметра (рис. 2.1). Определение заключается в сжигании навески топлива (около 0,5г) в сжатом кислороде с давлением 3 МПа внутри толстостенной калориметрической бомбы, помещенной в сосуд с водой. Нагрев воды (примерно на 1-2К) измеряется с высокой точностью (0,001 К). Ввиду незначительного возрастания температуры процесс рассматривается как изобарно-изотермический (т.е. при постоянных давлении и температуре  $p = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ ).

Количество теплоты, выделяемое при полном сгорании 1 кг топлива и охлаждении продуктов сгорания до стандартной температуры  $T=293\text{ K}$  ( $20^{\circ}\text{C}$ ), называется *удельной теплотой сгорания* или теплотворностью.

В тепловых двигателях продукты сгорания уносят с собой во внешнюю среду тепло, которое выделяется при конденсации паров воды, образуемой в калориметре при сгорании содержащегося в топливе водорода. Поэтому калориметрическая или *высшая* теплота сгорания  $H_0$  больше, чем реально получаемая в двигателе рабочая или *низшая* теплота сгорания  $H_u$ , которую вычисляют по формуле

$$H_u = H_0 - 2,5 W, \text{ МДж/кг},$$

где  $W$  – количество килограммов воды, соответствующей содержащейся в топливе массовой доле водорода  $[H] \approx 0,13 - 0,15$  (для керосинов и бензинов). Для них величина  $W \approx 9[H] \approx 1,15 - 1,35$  кг воды на 1 кг топлива. Следовательно, низшая теплота сгорания меньше высшей на 2,9 – 3,4 МДж/кг.

Кроме водорода в топливах (например, специальных, предназначенных для крылатых ракет) могут содержаться и другие элементы (металлы, бор), продукты сгорания которых в калориметре конденсируются с выделением тепла. При работе двигателя оно выбрасывается вовне без использования в рабочем процессе двигателя.

Таким образом, в общем случае, *низшая теплота сгорания представляет собой количество теплоты, выделяемое при полном сгорании 1 кг топлива и охлаждении продуктов сгорания до стандартной температуры 293K (20°C) при условии сохранения их в газообразном состоянии.*

**2.2.3. Вычисление низшей теплотворности на основе термодинамических функций.** Энергетический эффект любого физико-химического процесса равен разности энтальпии конечного и начального состояния вещества, а конкретно для процесса горения – разности энтальпии продуктов горения  $i_r$  и топлива  $i_t$ . Энтальпия – это термодинамическая функция, включающая в себя внутреннюю энергию вещества (для 1 кг газа), выражаемую как  $U = C_v T$ , где  $C_v$  – теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К), и механическую работу  $pV = RT$ , Дж/(кг·К), совершаемую при его введении во внешнюю среду с

давлением  $p$ , где  $V$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$  – удельный объем;  $R = R_\mu/\mu$  – газовая постоянная вещества;  $R_\mu=8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $\mu$ , кг/моль – молярная масса.

Изменение энтальпии при сгорании 1 кг топлива, приведенное к стандартным условиям,  $\Delta i_r = i_r^\circ - i_r^\circ$ , а величина  $H_u = -\Delta i_r = i_r^\circ - i_r^\circ$ . В справочниках приводятся табличные значения энтальпии образования сложных веществ для стандартных условий  $T = 293$  К,  $p = 0,1013$  МПа. При этом за нуль условно принята энтальпия простых веществ, наиболее устойчивых в стандартных условиях (газообразные водород  $\text{H}_2$  и кислород  $\text{O}_2$ , углерод  $\text{C}$  в виде твердого графита  $\text{C}_\text{т}$  и т.д.). Стандартная энтальпия сложных веществ  $i^\circ$  равна сумме энергетических эффектов при переходе от простых веществ к сложному (рис. 2.2). В таблицах она дается в кДж/моль, но при вычислении теплотворности топлива ее удобнее выражать в расчете на 1 кг исходного элемента, который сжигается в составе топлива (с обратным знаком). Для 1 кг водорода, превращаемого в водяной пар,  $i_{[\text{H}]}^\circ = 120,0$  МДж/кг, а для 1 кг углерода, превращаемого в газообразный диоксид углерода (углекислый газ),  $i_{[\text{C}]}^\circ = 32,8$  МДж/кг. Для самого же исходного углеводородного топлива сложного состава типа керосина или бензина в среднем  $i_r^\circ \approx 1,9$  МДж/кг (что соответствует теплоте, затрачиваемой на его фиктивное разложение с образованием простых веществ  $\text{H}_2$ -газ и  $\text{C}$ -графит). Если же известна конкретная формула углеводородного топлива – индивидуального вещества, например, метана  $\text{CH}_4$ , энтальпию топлива вычисляют путем деления табличного значения – 74,85 кДж/моль на молярную массу  $12,011 + 4 \cdot 1,008 = 16,044$  моль/кг и на  $10^{-3}$ , откуда  $i_{\text{CH}_4}^\circ = 4,66$  МДж/кг (с обратным знаком).

Следовательно, удельная теплота сгорания углеводородного топлива

$$H_u = 32,8[\text{C}] + 120[\text{H}] - i_r^\circ, \quad (2.1)$$

где  $[\text{C}]$  и  $[\text{H}]$  – массовые доли углерода и водорода в топливе. Чем больше массовая доля водорода, тем выше величина  $H_u$ , поскольку теплота сгорания водорода в 3,67 раза больше, чем углерода.

В конечном счете энергетический эффект сгорания можно представить как результат разложения топлива и реагирующего с ним молекулярного кислорода на атомы и образование из этих атомов молекул продуктов горения (рис. 2.2, слева).

**2.2.4. Примеры вычисления теплотворности топлив.** Пример 1. Керосин, элементный состав которого  $[\text{C}] = 0,86$  и  $[\text{H}] = 0,14$ , имеет низшую удельную теплоту сгорания  $H_u = 32,8 \cdot 0,86 + 120 \cdot 0,14 - 1,9 = 43,1$  МДж/кг.

Пример 2. Для вычисления низшей удельной теплоты сгорания метана  $\text{CH}_4$  предварительно определяется его элементный состав  $[\text{C}] = 12,011 / (12,011 + 1,008 \cdot 4) = 0,749$  углерода/кг топлива,  $[\text{H}] = 0,251$  водорода/кг топлива, и в формулу (2.1) подставляются эти значения и энтальпия метана  $H_u = 32,8 \cdot 0,749 + 120 \cdot 0,251 - 4,66 = 50,1$  МДж/кг.

Теплотворность некоторых углеводородных горючих веществ больше, чем суммарная теплота сгорания содержащегося в них углерода и водорода (например, у ацетилена  $\text{C}_2\text{H}_2$ ). Это объясняется тем, что их энтальпия образования по-

ложительна, вследствие чего при разрушении их молекул с превращением в простые вещества углерод и водород, происходит выделение энергии, которая при горении добавляется к тепловому эффекту окисления углерода и водорода. Эти топлива называются *эндотермическими*, поскольку при их образовании в них введена энергия.

В случае ацетилена энергия, выделяемая при разложении, которое может быть вызвано случайными факторами, способна спровоцировать взрыв. Ацетиленовые баллоны приходится заполнять активированным углем, в порах которого ацетилен защищен от энергетического воздействия его соседних порций, если произойдет их разложение.

В таблице 2.1 приведены значения теплотворности, элементный состав и энтальпия образования некоторых топлив, входящих в их состав групп углеводородов, некоторых индивидуальных углеводородов. Содержание в составе топлив негорючих элементов (азота, кислорода) влияет, разумеется, на долю горючих элементов, но непосредственного вклада в теплотворность не дают.

**2.2.5. Стехиометрический коэффициент топлива.** Полное окисление горючих элементов, содержащихся в топливе, с выделением энергии, равным теплотворности, происходит при химическом взаимодействии с необходимым для этого количеством окислителя, для воздушно-реактивных и поршневых двигателей – кислорода из поступающего в двигатель воздуха (в принципе окислителем могут быть и другие элементы (см. 5.1)). Количественные соотношения, в которых вещества реагируют друг с другом без остатка, образуя новые продукты реакции, называются *стехиометрическими* (в переводе с греческого – измерение основ). Стехиометрический коэффициент топлива, при горении которого окислителем является кислород,  $\nu_0$  = кг кислорода / кг горючего, определяется из уравнений реакций и мольной массы реагирующих веществ:

уравнения реакций	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$
мольная масса	12,011    31,998	2,016    15,999

Следовательно, на 1 кг углерода идет  $31,998 : 12,011 = 2,66$  кг кислорода, а на 1 кг водорода  $15,999 : 2,016 = 7,94$  кг кислорода – почти в 3 раза больше. Для сгорания 1 кг других горючих элементов (металлов, бора) требуется меньше кислорода.

Для углеводородного топлива стехиометрический коэффициент вычисляется по элементному составу:

$$\kappa_0 = 2,66[C] + 7,94[H], \quad (2.2)$$

а если молекулы горючего содержат долю кислорода  $O_r$ , который перейдет в продукты сгорания (например, молекулы спирта):

$$\kappa_0 = 2,66[C] + 7,94[H] - [O]_r \quad (2.2')$$

Реального окислителя для большинства двигателей – воздуха, содержащего 23,1% кислорода по массе, требуется в  $1/0,231 = 4,33$  раза больше. Соответственно, потребное количество воздуха  $L_0 = \kappa_0 / 0,231$  или  $L_0 = 4,33 \kappa_0$

Пример. Для сгорания 1 кг керосина, содержащего  $[C] = 0,86$  и  $[H] = 0,14$ , стехиометрический коэффициент по кислороду  $\kappa_0 = 0,86 \cdot 2,66 + 0,14 \cdot 7,94 = 3,40$ , и, соответственно, воздуха требуется  $L_0 = 3,40 / 0,231 = 14,7$  кг

Значение стехиометрического коэффициента различных горючих  $v_o$  и потребного для сгорания количества воздуха  $L_o$  приведены в таблице 2.2.

**2.2.6. Состав смеси.** При стехиометрическом соотношении горючих и окислительных элементов газообразное рабочее тело, обеспечивающее получение силы тяги или мощности двигателя, целиком состоит из продуктов сгорания. В нем нет избытка окислителя, но исходное количество окислителя достаточно для полного превращения топлива в продукты сгорания. Количественный состав как исходной горючей смеси, так конечных продуктов сгорания в этом случае выражается коэффициентом избытка окислителя  $\alpha = G_{ок}/G_{\epsilon}K_{\square} = 1$  (в случае окислителя – воздуха  $\alpha = G_{\epsilon}/G_{\epsilon}L_o$ ), где  $G_{\Gamma}$ ,  $G_{ок}$ ,  $G_{\text{в}}$  – секундные или часовые расходы соответственно горючего, окислителя, воздуха. По физическому смыслу величина  $\alpha$  выражает отношение реального количества окислителя к стехиометрическому, т.е. теоретически потребному для полного сгорания топлива.

Если  $\alpha > 1$ , смесь называется *бедной*, так как она содержит меньше горючего, чем можно было бы сжечь в содержащемся в ней окислителе. При  $\alpha > 1$  обеспечивается полное сгорание, а избыток окислителя, например, воздуха разбавляет рабочее тело двигателя.

Если  $\alpha < 1$ , смесь называют *богатой*, она содержит больше горючего, чем может сгореть из-за недостатка окислителя. Но в состав рабочего тела попадает не остаток исходного горючего, а продукты его разложения и частичного окисления, состав которых зависит от температуры и давления. Его определение слишком сложно и, как правило, не представляет практического интереса. Влияние состава смеси на некоторые энергетические эффекты показано на рис. 2.3.

**2.2.7. Теплопроизводительность.** Максимальное количество теплоты, выделяемое в расчете на 1 кг продуктов полного сгорания топлива ( $\alpha=1$ ) при охлаждении их до стандартной температуры 293 К (20°C), называется *теплопроизводительностью*.

В простейшем теоретическом случае, когда окислителем является газообразный молекулярный кислород, низшая теплопроизводительность выражается в расчете на 1 кг стехиометрической горючей смеси как теплотворность, деленная на суммарное количество топлива и кислорода:

$$h_u = H_u / (1 + \kappa_o) \quad (2.3)$$

Если окислителем является воздух, то вместо стехиометрического коэффициента  $v_o$  берется потребное количество воздуха  $L_o$  для сжигания 1 кг топлива:

$$h_u^{\text{в}} = H_u / (1 + L_o) \quad (2.3')$$

Теплопроизводительность углеводородных топлив при сжигании в воздухе согласно (2.3') в 15 – 16 раз меньше их теплотворности. Для всех углеводородных топлив независимо от их конкретного химического состава величина  $h_u \approx 2,75$  МДж/кг.

Таблица 1

Тепловые эффекты сгорания некоторых топлив при стандартных условиях  
(для керосинов, бензинов, групп углеводородов – средние значения)

Топливо	Формула	Состояние	Доля горючего элемента		Теплота окисления [C] и [H], МДж/кг	Энтальпия, МДж/кг	Удельная теплота сгорания, МДж/кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Энергоемкость, МДж/кг	Стехиометрический коэффициент		Теплопроизводительность	
			углерода [C]	водорода [H]						по кислороду	по воздуху	с кислородом, МДж/кг	с воздухом, МДж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Водород	H <sub>2</sub>	газ	-	1	120,0	-	120,0	70,8	8,496	7,936	34,36	13,43	27,903
Углерод	C	твердый графит	1	-	32,8	-	32,8	2250	73,8	2,664	11,535	8,05	1,387
Авиакеросины	$\Sigma C_n H_m$ n≈8-16 m≈15-36	жидкое	0,859	0,141	45,10	-1,7	43,37	778	33,8	3,42	14,8	9,81	2,745
Авиабензины	$\Sigma C_n H_m$ n≈5-16 m≈12-26	жидкое	0,850	0,15	45,88	-2,4	43,47	715	31,1	3,40	14,7	9,88	2,768
Автобензины	$\Sigma C_n H_m$ n≈4-12 m≈8-24	жидкое	0,852	0,148	45,70	-2,2	43,50	750	32,6	3,41	14,7	9,86	2,77
Парафины	$\Sigma C_n H_{2n+2}$ n≈5-18	жидкое	0,845	0,155	46,38	-2,1	44,28	700	31	3,49	15,05	9,86	2,757
Нафтенy, олефины	$\Sigma C_n H_{2n}$ n≈18	жидкое	0,856	0,144	45,36	-1,7	43,51	750	32,5	3,43	14,78	9,82	2,757
Ароматические угле-	$\Sigma C_n H_{2n-6}$ n≈7-18	жидкое	0,90	0,10	41,52	-0,53	39,9	850	33,9	3,20	13,8	9,5	2,7



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
водороды													
Метан	CH <sub>4</sub>	газ	0,749	0,251	54,69	– 4,6	50,1	0,716	0,0359	3,97	17,421	10,08	2,75
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	газ	0,799	0,201	50,33	–2,98	47,35	1,342	0,0636	3,71	16,05	10,05	2,78
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	газ	0,856	0,144	45,36	+1,86	47,22	1,251	0,0591	3,61	15,65	10,24	2,83
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	газ	0,922	0,072	39,51	+8,7	48,2	1,162	0,0550	3,08	13,26	11,57	3,42
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	газ	0,817	0,183	48,76	–2,23	46,53	1,967	0,0915	3,61	15,65	10,07	2,79
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	газ	0,826	0,174	47,97	–2,16	45,8	2,593	0,1188	3,57	15,45	10,02	2,78
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	жидкое	0,832	0,168	47,45	–2,38	45,1	6,26	28,2	3,34	15,34	9,93	2,76
Октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	жидкое	0,841	0,159	46,66	–2,23	44,43	703	31,3	3,50	15,14	9,87	2,76
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	жидкое	0,923	0,077	39,45	+0,63	40,1	879	35,25	3,08	13,26	9,83	2,81
Толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	жидкое	0,912	0,088	40,47	+0,18	40,7	867	35,287	3,12	13,50	9,88	2,81
Оксид углерода	CO	газ	0,4086	-	14,04	–3,85	11,8	1,25	0,0147	0,57	2,47	7,5	3,4
Метанол	CH <sub>4</sub> O	жидкое	0,372	0,125	27,30	–7,45	19,85	793	15,70	1,50	6,17	7,94	2,77
Этанол	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	жидкое	0,522	0,131	32,84	–6,06	26,77	789	21,12	2,08	9,00	8,69	2,67
Аммиак	NH <sub>3</sub>	газ	-	0,176	21,30	–4,10	17,2	0,771	0,0157	1,41	6,07	7,13	2,43
Гидразин	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	жидкое	-	0,126	15,12	+1,58	16,80	1,010	16,97	1,00	4,33	8,4	3,15
Диметил-гидразин	N <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>8</sub>	жидкое	0,400	0,134	29,21	+0,78	29,99	792	23,6	2,12	9,16	9,6	2,94
Литий	Li	твердое	[Li]=1	-	43,2	-	43,2	534	23,1	1,152	4,99	20,07	7,2
Бериллий	Be	твердое	[Be]=1	-	66,6	-	66,6	1855	123,0	1,775	7,69	24	2,66
Бор	B	твердое	[B]=1	-	58,6	-	58,6	2300	134,8	2,397	10,38	17,2	5,15
Магний	Mg	твердое	[Mg]=1	-	24,8	-	24,8	1740	37,9	0,658	2,85	13,15	5,66
Алюминий	Al	твердое	[Al]=1	-	31,0	-	31,0	2700	83,7	0,889	3,85	16,4	6,39

Это объясняется тем, что топлива, содержащие больше водорода, требуют для своего сгорания больше воздуха. Теплопроизводительность некоторых углеводородных топлив с меньшей величиной  $H_u$  может быть больше, чем углеводородных, из-за влияния низкого стехиометрического коэффициента (табл.1).

Иногда термин теплопроизводительность неправильно используют для характеристики *теплоподвода* к рабочему телу при  $\alpha \neq 1$ , т.е. от нестехиометрических продуктов сгорания:  $h_\alpha \approx \alpha H_u / (1 + \alpha v_0)$  или  $h_\alpha^B \approx \alpha H_u / (1 + \alpha L_0)$ . При  $\alpha < 1$  подобный расчет теплоподвода допустим до  $\alpha \approx 0,8$ , а при дальнейшем обогащении смеси тепловыделение  $\alpha H_u$  снижается более резко; при  $\alpha \approx 0,5-0,6$  горение вообще прекращается.

При  $\alpha > 1,5 - 1,7$  горение однородной смеси прекращается, но технически возможное подмешивание воздуха позволяет считать формальные значения теплоподвода до любого обеднения смеси, представляющего практический интерес (для ГТД до  $\alpha \approx 40-50$ ).

**2.2.8. Температура горения.** Температура горения в отличие от удельной теплоты сгорания не является константой вещества. Температуре пламени свойственна пространственно-временная неоднородность, непрерывные флуктуации (быстрые беспорядочные колебания). На нее влияют условия и неустойчивость тепло- и массообмена в процессе горения, многочисленные случайные факторы, а в плане определения ее реальных значений – технические трудности и значительные погрешности высокотемпературных измерений. Поэтому температуру горения топлив логично выражать расчетной величиной нагрева стехиометрических продуктов их сгорания. Она определяется по тепловому балансу на основе достаточно точных, физически обоснованных калориметрических измерений с последующими поправками на термическую диссоциацию и излучение.

Уравнение теплового баланса связывает теплопроизводительность и прирост температуры  $\Delta T_r = T_r - T_0$  (по отношению к исходной).

$h_u = C_p (T_r - T_0)$ , где  $C_p$ , Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении. Из баланса следует, что

$$T_r = T_0 + h_u / C_p \quad (2.4)$$

Полученную таким образом температуру горения обычно называют *калориметрической*. Поскольку для углеводородных топлив  $h_u \approx \text{const}$  (см. 2.2.7.), калориметрическая температура горения практически зависит только от теплоемкости  $C_p$  продуктов сгорания. Величина  $C_p$  значительно выше для водяного пара  $H_2O$  – продукта сгорания водорода, чем для диоксида углерода  $CO_2$  – продукта сгорания углерода. Соответственно, чем больше содержание водорода в топливе, тем ниже калориметрическая температура его горения (см. табл. 2.2). Но объем продуктов сгорания при этом больше, так как удельный объем водяного пара  $H_2O$  с мольной массой  $\mu = 18$  кг/кмоль более чем вдвое превышает удельный объем  $CO_2$  с величиной  $\mu = 44$  кг/кмоль. Удельный объем при нормальных условиях  $v = 22,415/\mu$  м<sup>3</sup>/кг



Высокая температура способствует термической диссоциации (распаду) продуктов сгорания, например,  $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH} + \frac{1}{2}\text{O}_2$ , а также эндотермическим реакциям типа  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ . Они снижают тепловой эффект реакций горения и температуру горения. Чем выше температура и ниже давление, тем сильнее диссоциация. При стандартных исходных условиях расчетная калориметрическая температура горения керосина в воздухе 2424К, а *теоретическая* температура, вычисленная с учетом термической диссоциации около 2280 К. Учет диссоциации дает не только снижение температуры горения, но и смещение ее максимума по составу смеси от  $\alpha = 1$  в область несколько обогащенных смесей  $\alpha \approx 0,90-0,95$ . Это объясняется увеличением содержания водорода  $\text{H}_2$  и монооксида углерода  $\text{CO}$ , более стабильных против диссоциации.

Температура горения топлива, определяемая по формуле (2.4) для  $\alpha \approx 1$ , характерна в случае диффузионного горения и для бедных смесей при суммарном  $\alpha > 1$  в камерах сгорания ГТД, при которых в зоне пламени  $\alpha \approx 1$  (см.2.3.5). Но в случае кинетического горения заранее перемешанного топлива с воздухом, которое свойственно поршневым двигателям с принудительным зажиганием (см. 8.1.1) температура пламени при  $\alpha > 1$  и  $\alpha < 1$  ниже, чем при  $\alpha = 1$  (рис. 2.3):  $T_{\text{г}} = T_0 + h_{\alpha}/C_p < T_0 + h_u/C_p$ , потому что  $h_{\alpha} < h_u$ . Уменьшение величины  $h_{\alpha}$  при обогащении смеси объясняется тем, что часть горючих элементов не окисляется, а при обеднении смеси – избытком окислителя, часть которого в процессе не участвует.

### 2.3. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ

**2.3.1. Воспламенение.** Под воспламенением имеется в виду *самовоспламенение* – возникновение процесса горения без контакта с горячими продуктами сгорания. Этим оно отличается от распространения пламени, при котором транспортировку теплоты и химически активных частиц в еще не воспламенившуюся горючую смесь осуществляют продукты сгорания ранее прореагировавших слоев топлива. Воспламенение – это начальная стадия горения, инициируемая любым способом нагрева горючей смеси: электрической искрой, раскаленной поверхностью, путем резкого сжатия, но не от пламени. Постепенный разогрев вплоть до самовозгорания может происходить и при медленном окислении горючего материала, например, промасленной ветоши.

Условием самовоспламенения является превышение скорости выделения тепла в экзотермической реакции (обычно – цепной реакции окисления) над скоростью отвода тепла из зоны реакции. Скорость теплоприхода  $+q$  экспоненциально зависит от температуры  $T$  в зоне химической реакции по уравнению Аррениуса пропорционально  $e^{-E_a/RT}$ , где  $e$  – основание натуральных логарифмов,  $E_a$  – энергия активации, свойственная данному топливу (горючей смеси),  $R$  – универсальная газовая постоянная (рис. 2.4, линия а). Скорость теплоотвода –  $q$  пропорциональна разности температур  $T - T_w$  горючего газа и более холодной стенки сосуда, в котором он находится, или, в общем виде, – горючего материала и той среды, куда может уходить выделяемое тепло.

На рис. 2.4 показаны условия самовоспламенения, как теплового взрыва, впервые обоснованные академиком Н.Н. Семеновым. При начальной температуре  $T_0$  скорость теплоотвода  $-q$  начиная с некоторого значения температуры  $T'$ , изменяющейся в ходе реакции, становится больше, чем скорость теплоприхода. В дальнейшем вследствие израсходования и понижения концентрации реагирующих веществ процесс вырождается и теплового взрыва не происходит. Начиная с более высокой исходной температуры  $T_0''$  в процессе реакции достигается температура  $T''$ , выше которой выделение теплоты превышает ее отвод. В результате этого скорость реакции растет, происходит тепловой саморазгон реакции и перерастание цепного процесса в тепловой взрыв. При еще более высокой начальной температуре  $T_0'''$  тепловыделение  $+q$  еще быстрее достигает уровня теплоотвода  $-q'''$ , а в дальнейшем превышает его. Возникающий саморазгон реакции вызывает тепловой взрыв. Из этого видно, что температура воспламенения не является константой вещества, она зависит от условий теплоотвода.

Время задержки (период индукции)  $\tau_i$  от момента нагрева очага воспламенения до появления пламени практически определяется моментом достижения критической скорости реакции, при которой  $+q = -q$ , т.е. теплоприход начинает превалировать над теплоотводом. В зависимости от состава топлива и условий протекания процесса  $\tau_i$  составляет от тысячной до десятой доли секунды, но при некоторых условиях она может достигать нескольких минут или даже часов.

Применение топлив с возможно меньшей задержкой самовоспламенения играет существенную роль в обеспечении безопасного запуска ракетных двигателей (см. 5.3.2) и в обеспечении плавной работы дизелей (см. 8.2.1.)

Применительно к зажиганию топлива в двигателях из рассмотренного соотношения потоков выделяемого и отводимого тепла следует необходимость рационального выбора размеров очага воспламенения: выделение тепла в первоначально подогреваемом объеме смеси пропорциональна его объему, а отвод – площади его поверхности. Размер очага воспламенения пропорционален их отношению. Поэтому при меньшей химической активности и теплотворности топлива нужны большие размеры очага воспламенения.

**2.3.2. Кинетическое ламинарное горение.** Решающее влияние на распространение пламени оказывают процессы смешения. Скорость горения неперемешанного горючего и окислителя обычно лимитируется относительно медленной взаимной диффузией, например, паров топлива и воздуха, а не скоростью химических реакций. Если же скорость реакции меньше скорости смешения или реакция идет в заранее подготовленной смеси горючего и окислителя со скоростью, определяемой кинетикой химических реакций, горение называется *кинетическим*.

Скорость кинетического горения зависит от характера движения газа. В невихренной смеси паров керосина или бензина с воздухом *ламинарное* распространение пламени происходит в виде гладкого фронта с нормальной (по нормали к фронту) скоростью  $u_n \approx 0,3$  м/с. Классическая схема нормального горения является исходной для представления о более сложных формах горения.

Узкую, порядка 0,1 мм, зону нормального горения удобно считать не объемом, а поверхностью, фронтом качественного скачка. В нем вместе с резким

повышением температуры происходит резкий переход состава газа от исходной горючей смеси до конечных продуктов сгорания, сопровождаемый тепловыделением. Сужение зоны пламени объясняется саморазгоном химических реакций вследствие резкой (экспоненциальной) зависимости их скорости от температуры по уравнению Аррениуса (см. 2.3.1).

Находящийся перед фронтом пламени слой свежей смеси нагревается горячими газами и химически активизируется свободными атомами, ионами и радикалами (электрически заряженными фрагментами молекул), испускаемыми пламенем. Зона нагрева в несколько раз шире зоны реакции (рис. 2.5). Темп подогрева свежей смеси зависит от ее физических свойств: он тем выше, чем больше ее теплопроводность,  $\lambda_0$ , Дж/(с.м.К.), меньше теплоемкость  $C_p$ , Дж/(кг·К) и плотность  $\rho_0$  (кг/м<sup>3</sup>). Получив энергию активации  $E_a$ , достаточную для начала реакции (что соответствует нагреву до температуры начала реакции  $T_{нр}$ ), прилегающая к пламени свежая смесь загорается.

**2.3.3. Нормальная скорость горения.** Скорость, с которой фронт пламени перемещается относительно однородной незавихренной горючей смеси по нормали к своей поверхности, называется *нормальной* или *фундаментальной* скоростью горения  $u_n$ . За волной горения остается прореагировавший газ, нагретый до температуры горения  $T_r$  (продукты сгорания).

Формула нормальной скорости горения выводится из выражения теплового потока – порции тепла, поступающего в зону прогрева из зоны реакции за 1 с вследствие теплопроводности свежей смеси (на рис. 2.5 толщина зоны прогрева  $\delta_n$ , а зоны реакции –  $\delta_p$ ):

$$q = \frac{\lambda_0}{\delta_n} (T_{нр} - T_0) = u_n \rho_0 C_{po} (T_{нр} - T_0)$$

Для выполнения необходимых преобразований этого выражения используется подобие треугольников, гипотенузами которых являются участки линии профиля температур:

$$(T_{нр} - T_0) / \delta_n = (T_r - T_{нр}) / \delta_p,$$

а также представление толщины зоны реакции через время (продолжительность) химической реакции  $\tau_x$  и нормальную скорость горения  $\delta_p = u_n \tau_x$ . Это позволяет связать между собой показатели физических свойств свежей смеси, профиля температур и нормальную скорость горения следующим образом:

$$\frac{\lambda_0}{u_n \tau_x} (T_r - T_{нр}) = u_n \rho_0 C_{po} (T_{нр} - T_0)$$

или

$$u_n^2 = \frac{\lambda_0}{\rho_0 C_{po}} \cdot \frac{T_r - T_{нр}}{T_{нр} - T_0} \cdot \frac{1}{\tau_x}$$

Величина  $\lambda_0 / \rho_0 C_{po} = a_0$  – температуропроводность свежей смеси,  $(T_r - T_{нр}) / (T_{нр} - T_0) = \theta$  – характеристика профиля температур, действующего на нормальную скорость горения. Следовательно, нормальная скорость горения  $u_n = \sqrt{a_0 \theta / \tau_x}$ . Она зависит (но не резко) от физических свойств и начальной

температуры свежей смеси, от состава и химических свойств топлива. Величина  $u_n$  может рассматриваться как константа вещества. Для большинства углеводородно-воздушных смесей при  $\alpha = 1$  нормальная скорость горения от 0,2 до 0,7 м/с. Газам с высокой температурой горения из-за термической диссоциации свойственно еще большее смещение максимального значения  $u_n$  в область богатых смесей, чем смещение максимума температуры. У ацетилена  $C_2H_2$  максимум  $u_n = 1,45$  м/с при  $\alpha = 0,85$ , у водорода  $u_n = 2,59$  м/с при  $\alpha = 0,5$  (рис. 2.6).

Пределы распространения пламени по концентрации объясняются понижением тепловыделения вследствие обогащения или обеднения смеси: нагрев свежей смеси, примыкающей к фронту пламени, не достигает температуры начала реакции.

Скорость распространения искривленного фронта пламени относительно свежей смеси больше нормальной скорости горения (закон Михельсона):

$$v_n = u_n / \cos \beta;$$

где  $\beta$  - угол между направлением распространения и нормалью к фронту пламени (рис. 2.7). Чем более изогнута поверхность пламени, тем быстрее оно распространяется и больше топлива сгорает в единицу времени.

**2.3.4. Турбулентное распространение пламени.** Большое влияние на скорость распространения пламени оказывает турбулизация, завихрение потока горючей смеси. Скорость пламени увеличивается в десятки раз, во-первых, из-за искривления фронта пламени и резкого увеличения его поверхности, что повышает количество вещества, сгорающего в единицу времени. Во-вторых, турбулентные пульсации усиливают процессы диффузии и теплопроводности, ускоряя прогрев прилегающих к фронту пламени слоев свежей смеси.

При интенсивной крупномасштабной турбулентности от фронта пламени отрываются горящие объемы газа, проникают в свежую смесь и создают новые очаги пламени (эстафетное распространение пламени). Горение идет не в узком фронте, а в объеме турбулентного факела, хотя "поверхностный" физико-химический механизм горения по разорванным поверхностям многочисленных разветвленных фронтов пламени в принципе сохраняется.

В камерах сгорания двигателей потоки всегда турбулизированы и пламя распространяется в них со скоростью турбулентных пульсаций  $v_{пульс} \gg u_n$  – десятки метров в секунду, что практически сводит на нет влияние химического состава топлива:

$$v_t = u_n + v_{пульс} \approx v_{пульс}$$

Кроме крупномасштабных турбулентных пульсаций при турбулентном горении существуют мелкомасштабные турбулентные пульсации, величина которых соизмерима с длиной свободного пробега молекул. Они увеличивают число столкновений молекул и дают дополнительное повышение скорости турбулентного горения, как бы повышая нормальную скорость горения. В целом скорость турбулентного горения достигает нескольких десятков метров в секунду.

**2.3.5. Диффузионное горение.** Физико-химический механизм горения, при котором скорость смешения (диффузии) меньше скорости реализации и поэтому определяет течение процесса, называется *диффузионным*. Если предста-

вить время диффузионного горения в виде суммы  $\tau_r = \tau_{см} + \tau_x$ , где  $\tau_{см}$  – время, необходимое на смешение, а продолжительность протекания химической реакции  $\tau_x \ll \tau_{см}$ , то  $\tau_r \approx \tau_{см}$ . Как только произошло смешение, реакция практически не задерживает процесс. Продолжительность смесеобразования связана коэффициентами молекулярной и турбулентной диффузии  $D_m$  и  $D_t$  с природой вещества, причем решающую роль в реальных камерах сгорания играет турбулентная диффузия. Это позволяет считать

$$\tau_{см} \approx \delta_{см} / D_t \quad (2.5)$$

где  $\delta_{см}$  – ширина зоны смешения (или масштаб турбулентности). Она может быть дополнительно замедлена процессом испарения жидкого топлива.

Ширина зоны реакции диффузионного горения во много раз меньше ширины зоны смешения, но она не может быть более узкой, чем зона нормального горения, так как интенсивность диффузионного горения ниже, чем нормального (кинетического) из-за большой теплоотдачи и более низкой температуры диффузионного пламени. В простейшем случае спутных струй двух компонентов – горючего газа и воздуха – пламя локализуется на границе струй, где соотношение компонентов близко к стехиометрическому ( $\alpha \approx 1$ ). Горючий газ и окислитель (воздух) диффундируют во фронт пламени с противоположных сторон (рис.2.8). Если один из реагентов поступает в зону горения в избытке, то фронт пламени смещается в сторону второго компонента, еще не принявшего участия в реакции. Фронт пламени самоуставливается так, чтобы подходящие к нему с двух сторон компоненты оказались в стехиометрическом соотношении. Он становится мгновенной стехиометрической ( $\alpha=1$ ) поверхностью раздела между горючим компонентом и воздухом, через которую они не могут прорваться, так как скорость реакции между ними во много раз больше скорости смешения.

Продукты сгорания, отходящие от фронта пламени им навстречу, подогревают и химически подготавливают компоненты к взаимодействию. Диффузионный факел, как правило, дробится на мелкие очаги, которые деформируются и переносятся турбулентными пульсациями по объему камеры сгорания.

Скорость диффузионного горения практически полностью определяется интенсивностью перемешивания. Она не зависит от общего состава смеси, на нее слабо влияет химическая природа топлива. С увеличением доли диффузионного сжигания топлива повышается устойчивость процесса горения, так как увеличивается неравномерность смеси, в том числе количество надежно выгорающих стехиометрических участков, но для завершения процесса горения, обеспечения полноты сгорания необходима большая протяженность зоны горения.

## 2.4. САЖЕОБРАЗОВАНИЕ

**2.4.1. Генезис сажи.** При диффузионном горении обязательным продуктом промежуточного (до контакта с воздухом) химического превращения углеводородов является дисперсный углерод – сажа. Поток свежего топлива, приближающегося к фронту пламени, подвергается энергетическому воздействию отходящих навстречу ему горячих продуктов сгорания, а также лучеиспускания

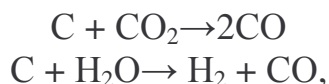


самого фронта. Происходит пиролиз – тепловое (буквально "огневое") разложение углеводородных молекул топлива (рис. 2.9).

От углеродного скелета молекул отрываются атомы водорода (происходит дегидрогенизация топлива), а сам углеродный скелет разрывается на фрагменты с образованием сверхактивных карбенов типа  $\text{H}_2\text{C}:$ ,  $\text{H}_2\text{C}=\text{C}:$  и др. Из карбенов практически мгновенно, за миллионные доли секунды, формируются микроскопически малые, диаметром примерно 0,02-0,04 мкм сферические матово-черные частицы сажи. Они состоят из нескольких тысяч углеродных кристаллов, слои которых вглубь частиц в основном аналогичны по очертанию поверхности частиц (рис. 2.10). Частицы сажи неразличимы невооруженным глазом, о наличии сажи свидетельствует желтый или оранжевый цвет раскаленного сажевого аэрозоля. При отсутствии сажи пламя голубое, так выглядит факел в форсажной камере, в которой физико-химический механизм горения ближе к кинетическому.

Таким образом, появление сажи в основных камерах сгорания авиационных двигателей отнюдь не является результатом недогорания топлива из-за плохой организации рабочего процесса. Образование частиц сажи, и как правило, их кратковременное (до миллисекунды) существование – это одна из стадий нормального рабочего процесса двигателя.

**2.4.2. Свойства сажевого аэрозоля.** Быстрая, вслед за образованием, газификация сажевого аэрозоля (точнее – его твердофазной составляющей) происходит при взаимодействии с продуктами полного сгорания топлива  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которые отходят от фронта пламени:



а оксид углерода  $\text{CO}$  и молекулярный водород  $\text{H}_2$  окисляются в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  во фронте пламени при контакте со встречным потоком кислорода (см. рис. 2.9).

Но квазистационарная концентрация частиц сажи, существующих от момента образования до момента газификации, которая в значительной мере зависит от структуры углеводородов топлива, может быть достаточно высокой –  $10^{15} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$  [3]. Из-за электрического заряда частиц, возникающего вследствие потери электронов, частицы отталкиваются друг от друга и до фронта пламени не образуют агломератов. Известно, что излучение твердого тела во много раз больше, чем излучение газов при той же температуре. Соответственно, за счет твердой сажи сажевый аэрозоль испускает мощное электромагнитное излучение в световом и, главным образом, инфракрасном диапазоне длиной волн 1-2 мкм. Оно не ослабляется заградительным слоем воздуха и переносит большую часть теплоотдачи от факела в стенки камеры сгорания (в современных ГТД – порядка мегаватта, что соизмеримо с мощностью городской электростанции). По эмиссии лучистой энергии сажевое пламя подобно твердому телу, а не газу. Оно является также источником и носителем электрического заряда, индуцирующего электризацию летательного аппарата, напряжение которого достигает 3-5 кВ и более. Электростатический заряд поверхности ЛА способствует грозоопасности.

При недостаточно совершенной организации рабочего процесса в камере сгорания часть сажи, не успев газифицироваться, прорывается через фронт горения, теряя при этом электрический заряд. Сажевые частицы коагулируют, образуя нити, гроздья, хлопья, создают различимый глазом проходящий через газовый тракт дым. Он загрязняет атмосферу в районе базирования авиации, а также экологически опасен вследствие адсорбции на поверхности дисперсного углерода побочных канцерогенных и мутагенных продуктов горения, отравляющих персонал и пассажиров. Кроме того, дымовой след демаскирует ЛА в полете, повышая его уязвимость в боевых условиях.

**2.4.3. Роль структуры молекул углеводородов.** Сажистость пламени возрастает с повышением молярной массы углеводородов и компактности углеродного скелета их молекул [25]. Количество взвешенной в пламени сажи возрастает примерно вдвое с увеличением доли вторичного углерода (атомов С, имеющих по две связи с соседними атомами углерода, по отношению к первичному, атомы которого имеют по одной связи), втрое – доли углерода, входящего в ароматические кольца, вчетверо – доли третичного углерода и в 8 раз – четвертичного (рис. 2.11).

Такое их влияние можно объяснить различной (в долях микросекунды) задержкой перехода соответствующей доли углерода в твердую фазу при пиролизе углеводородных молекул и, соответственно, различным временем существования до газификации в пламени. Оно объясняет различную степень черноты факела разных топлив, позволяет принять показатели свечения, отражающие степень черноты пламени, за характеристику его сажистости, и обосновывает возможность регламентации качества топлив по такому показателю (см. 3.8.1).

## 2.5. ДЕТОНАЦИЯ

**2.5.1. Физико-химическая природа детонации.** Детонация (*detono* – лат. *гремлю*) – это особый вид горения, волна которого распространяется с огромной скоростью (километры в секунду). Причиной ее возникновения является воздействие ударной волны на горючее или взрывчатое вещество, обладающее высокой химической активностью – смесь горючего газа с кислородом или воздухом, унитарное жидкое или твердое ракетное топливо, жидкое или твердое ВВ. Механизм ее распространения адиабатный, без теплообмена. Он заключается в передаче давления от слоя к слою, а не в передаче теплоты от нагретых реакцией слоев.

В детонационной волне идут несколько взаимосвязанных процессов (рис.2.12). Скачок ударного повышения давления и температуры вызывают самовоспламенение с чрезвычайно коротким периодом индукции (порядка  $10^{-6}$  с). В примыкающей к ударной волне зоне реакции происходит практически мгновенное (за время порядка  $10^{-5}$  с) химическое превращение исходного вещества в продукты сгорания и, одновременно, преобразование химической энергии в тепловую и механическую. В сравнении с обычным горением при постоянном объеме повышение давления примерно вдвое больше и, соответственно, выше температура (порядка 4000 К). Выделяемая при реакции энергия поддерживает ударную волну. Детонация – комплекс самоподдерживающихся процессов.



Скорость ее распространения  $D \approx \sqrt{2h_u(\kappa^2 - 1)}$ , где  $h_u$  – теплопроизводительность,  $\kappa$  – показатель адиабаты [31] (вывод этой простой формулы достаточно сложен).

Таким образом, *детонационная волна представляет собой совместное распространение мощной ударной волны давления и волны горения со скоростью несколько километров в секунду.*

Часть вещества, необходимого для образования плотной зоны детонационной волны, как бы "подсасывается" из продуктов сгорания, которые отстают от детонационной волны на величину скорости звука в продуктах сгорания  $a_r = \sqrt{\kappa_r R_r T_r}$  (где  $\kappa_r$  – показатель адиабаты,  $R_r$  – газовая постоянная,  $T_r$  – температура продуктов сгорания). За детонационной волной следует волна разрежения и как бы "дует ветер" с меньшей скоростью  $W = D - a_r$ , поскольку расширяющиеся продукты сгорания отходят от детонационной волны со скоростью звука в противоположную сторону.

Кинетическая энергия продуктов реакции за детонационной волной составляет около 15% теплоты сгорания. Полная энергия детонационной волны примерно в 1,5 раза больше теплоты сгорания. Избыток энергии сверх 100% достигается в момент образования продуктов реакции за счет расширения, охлаждения и торможения ранее прореагировавших слоев вещества [10].

**2.5.2. Возникновение детонации.** Возбуждение самовоспламенения и формирование детонационной волны происходит при контакте интенсивной ударной волны с химически активным, способным детонировать веществом.

Иницирующая детонацию ударная волна может возникнуть вследствие взрыва наиболее активного участка внутри объема вещества при внешнем ударе или нагреве. Причиной детонации может быть воздействие ударной волны извне, а также образование ударной волны в результате торможения сверхзвукового потока горючего газа.

Появление ударной волны возможно также вследствие разгона фронта обычного пламени в достаточно длинной трубе. Исходящие из зоны горения волны давления опережают фронт пламени и вызывают нарастающий нагрев вещества перед ним. Вследствие этого повышается скорость последующих волн давления, они нагоняют предыдущие вплоть до появления скачка давления, скорость которого превышает скорость звука.

**2.5.3. Последствия и использование детонации.** При наталкивании детонационной волны на препятствие давление резко увеличивается – приблизительно в 3 раза, то есть примерно в 6 раз превышает давление взрыва. Соответственно, разрушающее действие боевых средств поражения, а также разрушения в технических целях во многих случаях целесообразно обеспечивать путем инициирования детонации.

Но неуправляемое детонационное сгорание может спровоцировать возникновение распространяющейся на большое расстояние ударной волны, которая явится источником взрывопожароопасности для находящихся вблизи боеприпасов и других изделий, начиненных ВВ, или вещества, способные самовоспламениться при ударном воздействии. В ракетном двигателе накопление и де-

тонация топлива в камере сгорания, обусловленная неисправностью топливной системы или некачественным компонентом топлива, может разрушить камеру сгорания или весь двигатель (см. 5.3.2).

В поршневых двигателях в случае применения низкооктанового бензина (см. 8.1.3) может иметь место детонация небольших порций топлива в каждом рабочем цикле и вызвать опасные для двигателей тепловые и механические нагрузки. Процесс возникновения и развития детонации в поршневом двигателе имеет свою специфику, отличающуюся от классической детонации.

При распространении фронта пламени после зажигания бензино-воздушной смеси, когда значительная ее часть сгорела, последние порции смеси перед воспламенением оказываются сильно сжатыми (до нескольких мегапаскалей) и нагретыми (до нескольких сотен градусов). Они проходят несколько стадий окисления, в том числе "холоднопламенного", при котором образуются взрывчатые пероксиды. Если взрывное самовоспламенение пероксидов успевает произойти еще до подхода фронта пламени, в камере сгорания возникает ударная волна, распространяющаяся совместно со сгоранием последней порции рабочей смеси, а затем многократно отражающаяся от стенок. Концентрация пероксидов, возбуждающая детонацию, возникает в случае применения низкокачественного недостаточно стойкого к детонации бензина или способствующих детонации условий рабочего процесса.

Заманчивой с точки зрения повышения экономичности двигателей, в первую очередь – авиационных, является проблема детонационного сжигания топлива в основном рабочем процессе вместо используемого в ГТД изобарного горения ( $p = \text{const}$ ), соответствующего циклу Брайтона. Давние попытки организации рабочего процесса ВРД с многократным, сотни и даже тысячи раз в минуту, изохорным (при постоянном объеме) горении топлива в детонационной волне, пересекающей камеру сгорания, были неудачными из-за сложности клапанной системы наполнения, недопустимых потерь топлива при использовании резонансной системы наполнения и неприятного шума двигателя при его частотах, воспринимаемых слуховым аппаратом человека.

В последние годы начата разработка высокочастотных (до 25 кГц) резонансных пульсирующих детонационных двигателей (ПудД, ДРД), на основе комплексов малоразмерных (порядка 0,1 м) чашеобразных тяговых устройств. Их удельный импульс тяги примерно в 1,5 раза больше, чем у лучших современных ГТД (соответственно меньше удельный расход топлива), они не издают слышимого шума при работе, обладают хорошими габаритно-массовыми характеристиками [18]. Были проделаны реальные эксперименты на авиационном керосине, газообразном ацетоне, предполагается применение метана (скорее всего в виде сжиженного природного газа – СПГ). Сущность процесса в каждом рабочем цикле заключается в подаче топливо-воздушной смеси через кольцевое сверхзвуковое сопло, ее ударном самовоспламенении в центре газодинамического диска вблизи входа тягового устройства, возникновении и распространении детонационной волны, ее толчке в тяговую стенку, а затем выходе продуктов сгорания вслед за отраженной волной. В случае успешного результата этой разработки может существенно измениться облик перспективной авиационной техники, а главным авиационным топливом будет СПГ.

## 2.6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗРЫВОПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ

**2.6.1. Пожар и взрыв.** Пожар – это неконтролируемое горение вне специального очага (вне камеры сгорания, топки, горелки и т.п.), наносящее материальный ущерб. При пожаре в незамкнутом пространстве давление, как правило, практически не изменяется. Повышение давления и взрыв могут быть обусловлены чрезвычайно высокой химической активностью загоревшегося вещества, при котором линейное расширение образующихся продуктов сгорания превышает скорость звука.

Горение в замкнутом объеме почти и всегда приводит к быстрому нарастанию давления и взрыву, в случае вещества высокой активности – имеющему характер детонации. Из-за быстрого возрастания давления взрыв сопровождается механическим воздействием на окружающую среду, вызывает разбрасывание горящего вещества, разрушение емкостей и других объектов. Ущерб, наносимый взрывом, распространяется и за пределы зоны горения, так как среда, окружающая очаг взрыва, испытывает сжатие и приобретает большую скорость. Движение передается от одного слоя к другому в форме взрывной волны. По мере удаления от места взрыва давление уменьшается, а время его действия растет.

**2.6.2. Источники пожара и взрыва.** Причиной взрыва и пожара самолетов и вертолетов, заправленных ГСМ, а также содержащих ГСМ наземных емкостей, трубопроводов и транспортных средств являются, как правило, ошибочные и неумелые действия персонала, прежде всего – по обращению с ГСМ и горючими газами, незнание их свойств или пренебрежение порядком их использования. Сюда относится и самовоспламенение из-за недопустимо сильного нагрева горючих веществ (теплового самовозгорания), микробиологического возгорания растительных материалов (скирды сена, кучи опилок). Химическое самовозгорание происходит при неконтролируемых контактах горючего с сильным окислителем (азотной кислотой, перманганатом калия, селитрой и др., а также со сжатым кислородом), карбида кальция и щелочных металлов с водой и др.

Другой, не столь частой причиной являются неисправности и отказы техники, влекущие за собой авиационные происшествия (аварии двигателей практически всегда сопровождаются пожаром), аварии наземных технических средств, неисправности электрооборудования. К ним примыкают разряды статического электричества. Пожар может возникнуть от искры, курения, брошенной сигареты, из-за разведения огня в темное время суток вблизи объектов с горючим. "Шнур" паровозного бензина, ползущий по поверхности способен перебросить пламя к открытой или неплотно закрытой горловине на расстояние в несколько десятков метров.

Еще одна причина – удары молнии и другие природные факторы, вызывающие нарушение нормальной работы или разрушение технических устройств, в том числе связанных с ГСМ.

И, наконец, в известных условиях причиной взрывов и пожаров являются боевые, диверсионные и террористические действия противника, а также вандализм и хулиганство.

**2.6.3. Огнеопасность ГСМ.** Инициирование взрыва или пожара различными источниками в высокой степени зависит от свойств и состояния ГСМ и других веществ, способных воспламеняться и взрываться.

При воздействии внешнего пламени или искрения неисправного электрооборудования на пары топлива и других легковоспламеняющихся жидкостей главным показателем огнестойкости считается температура вспышки, определяемая при помощи специального прибора в закрытом тигле и открытом тигле. Температурой вспышки называется наименьшая температура топлива (или другой жидкости), при которой пары над его поверхностью образуют смесь с воздухом, вспыхивающую при поднесении пламени. Она зависит от физических свойств ГСМ – в первую очередь от давления пара. Вспышка с последующим погасанием происходит при парциальном давлении паров нефтяного топлива над его поверхностью 1,0-1,3 кПа (для авиационных керосинов типа РТ и ТС-1 температура вспышки порядка 30<sup>0</sup>С). Скорость их образования при этом еще недостаточна для последующего горения. Устойчивое пламя над поверхностью топлива устанавливается при температуре на 1-5<sup>0</sup>С выше температуры вспышки.

Бензины и реактивные топлива (за исключением сорта Т-6 с температурой вспышки не ниже 61<sup>0</sup>С) относятся к легковоспламеняющимся жидкостям, признаком которых является температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, не выше 61<sup>0</sup>С, а в открытом тигле не выше 65<sup>0</sup>С. Их принято делить на 3 разряда огнестойкости: I разряд – особо опасные, их температура вспышки минус 18<sup>0</sup>С и ниже в закрытом тигле, минус 13<sup>0</sup>С и ниже в открытом тигле; II разряд – постоянно опасные с температурой вспышки в закрытом тигле от минус 18<sup>0</sup>С до + 23<sup>0</sup>С, в открытом тигле от минус 13<sup>0</sup>С до + 27<sup>0</sup>С; III разряд – опасные при повышенной температуре, их температура вспышки в закрытом тигле выше 23 до 61<sup>0</sup>С, в открытом тигле выше 27 до 66<sup>0</sup>С.

Горючие жидкости с более высокой температурой вспышки продолжают гореть после удаления источника воспламенения, если они нагреты до температуры на 30-35<sup>0</sup>С выше температуры вспышки.

Температурный рубеж 61<sup>0</sup>С определяет количество противопожарного оборудования конкретных объектов техники. Так, на авианосце, ЛА которого используют топлива с более низкой температурой вспышки, должно быть примерно на 1000т больше средств пожаротушения, чем при использовании топлив с температурой вспышки выше 61<sup>0</sup>С. Уровень нагрева жидких ГСМ для воспламенения от внешнего источника, определяемый физическими факторами, не имеет никакого отношения к требуемому уровню нагрева для самовоспламенения, определяемого химическими факторами. Чем выше температура вспышки, тем он, как правило, ниже. Дизельные топлива и керосины самовоспламеняются при более низкой температуре, чем бензины, а масло – при еще более низкой, топливо Т-6 – при более низкой температуре, чем ТС-1.

**2.6.4. Особенности пожара наземных емкостей.** Тепло из зоны горения над жидкостью передается к поверхности жидкости излучением. Поток тепла тем интенсивней, чем больше температура горения и степень черноты пламени. При практически равной температуре горения излучение оранжево-желтого сажаистого факела интенсивней, чем голубого или бесцветного, не содержащего



сажи. Это тепло обеспечивает прогрев горючей жидкости в глубину, ее испарение и определяет поступление в горящий факел над жидкостью. Температура верхнего слоя жидкости при пожаре в крупных емкостях возрастает в течение первых 10 минут, а затем остается практически постоянной – для бензина 90-110<sup>0</sup>С, керосина 170-220<sup>0</sup>С, дизтоплива 230-240<sup>0</sup>С (выше температуры начала выкипания). Температура стенок выше, чем верхнего слоя жидкости; прилегающая к стенке жидкость горячее, чем в центре, и обычно закипает.

Создаются конвективные потоки, переносящие тепло вглубь жидкости. В редких случаях, при длительном горении (45-60 мин) особенно при наличии воды в топливе, вскипание происходит внезапно, с выбросом горячей жидкости из резервуара на значительную площадь вблизи него (десятки метров), покрывая все, что на ней находится. Чаше обводненное топливо при горении вспенивается и медленно переливается через края резервуара. Признаком приближающейся опасности являются увеличение размеров факела, шипящий звук, вибрации стенок резервуара. Иногда вскипание провоцируется попытками тушения путем подачи воды или пены на горящую поверхность жидкости [9].

**2.6.5. Особенности пожара ЛА.** Главная особенность пожара ЛА – его кратковременность, необратимость разрушений и невозможность прямого вмешательства вне зоны двигателей и кабин, защищенных огнегасительными системами с автоматическим срабатыванием. Спецификой пожара ЛА при аварии и катастрофе, когда происходит разрушение топливных баков с вытеканием и горением керосина, является быстрое возрастание площади горения, практически исключающее возможность спасения людей и летательного аппарата. В этом отношении уменьшение опасности сулит перспектива применения криогенных топлив: сжиженного природного газа (СПГ), жидкого водорода. При разрушении криогенных баков происходит быстрое испарение и улетучивание вытекающего или горящего криотоплива, что позволяет сохранить людей и летательный аппарат. В этом отношении жидкий метан и СПГ с температурой кипения минус 162<sup>0</sup>С менее огнеопасны, чем керосин, а жидкий водород с температурой кипения минус 253<sup>0</sup>С еще менее огнеопасен [13].

**2.6.6. Мероприятия по защите от пожаров и взрывов.** Боевая живучесть военных летательных аппаратов и безопасность полетов пассажирских самолетов и вертолетов зависит от эффективности и надежности систем и методов, применяемых для их защиты от пожара и взрыва. Так, обеспечение полной взрывобезопасности топливных баков позволяет повысить боевую живучесть самолетов и вертолетов приблизительно в 3-4 раза [16].

Конструктивные мероприятия, предотвращающие условия возникновения пожара или взрыва или обеспечивающие локализацию очага пожара для облегчения борьбы с ним, являются обязательной частью создания современных ЛА. К их числу относятся различные способы создания препятствий для распространения пламени: автономные отсеки, противопожарные перегородки, тепло-вые экраны. Другим комплексом мероприятий является защита от воздействия опасных во взрывопожарном отношении отказов и неисправностей отдельных устройств: бронирование автономных отсеков агрегатов, отдельная компоновка топливных, масляных, гидравлических магистралей, электрокабелей, меха-

низмов управления. При разрушении трубопроводов вытекающее топливо должно быстро выливаться наружу через дренажные отверстия в мотогондолах. Целесообразно наличие устройств для отстреливания горящих двигательных отсеков, перегородок для изоляции воздушного канала от топливных баков, чтобы предотвратить выплеск топлива на двигатели при боевом повреждении баков.

Конструктивно сложны, но эффективно предотвращают взрыв баки переменной геометрии, объем которых уменьшается по мере выработки топлива, чтобы в них не было надтопливного пространства. В обычных баках взрывоопасность возрастает после выработки топлива: в них образуется большой объем смеси воздуха с парами топлива, концентрация которой тем выше, чем больше давление насыщенного пара топлива.

Для уменьшения уязвимости самолетов от воздействия молний, удары которых, как правило, направлены вдоль оси симметрии фюзеляжа и консольных частей стреловидного крыла, трубопроводы следует располагать вне опасных зон, а концевые топливные баки выполнять толстостенными, выдерживающими прямой удар молнии. Композиционные материалы, механические свойства которых резко ухудшаются при воздействии электрических разрядов, следует защищать тонким внешним покрытием из проводящего материала.

Используется также ряд профилактических мероприятий – вентиляция теплонапряженных конструкций; перекрытие доступа воздуха в те отсеки, куда могут попасть пары топлива; отсос паров из надтопливного пространства баков; запираание подачи топлива в аварийный двигатель. Разумеется, при эксплуатации авиационной техники должны строго соблюдаться правила ее заправки ГСМ, систематически проверяться герметичность систем и исправность электрооборудования.

На большинстве самолетов и вертолетов применяются активные средства и методы защиты от пожара и взрыва: системы сигнализации (тепловые, ионизационные, радиационные), противопожарные системы, системы защиты от взрыва или автоматического подавления взрыва. В противопожарной системе баллоны высокого давления заправлены запасом огнегасительного состава (см.10.4.2), который подается в зону пожара с помощью коллекторных распылительных устройств или форсунок. Время срабатывания системы не должно превышать 5-8с (включая время срабатывания сигнализации). Быстродействие обеспечивается пироголовкой, в которой при взрыве пиропатрона пробивается мембрана, открывающая выход огнегасительному составу в магистральный трубопровод.

Защита топливных баков от взрыва осуществляется несколькими способами. Главный из них – криогенный: обработка топлива жидким азотом до заправки или во время заправки. Газификация и барботаж азота способствует вымораживанию воды, удалению кислорода и растворению азота, а надтопливное пространство заполняется нейтральным газом – азотом. Кроме того, запас жидкого азота для использования в полете хранят в баллонах и используют по мере расходования топлива. В качестве нейтрального газа для заполнения пространства используется также диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , который тоже хранят в баллонах в сжиженном виде или получают сжиганием топлива в специальных камерах сгорания с последующим вымораживанием воды. Система нейтрального

газа может действовать не в течение всего полета, а включаться в боевой обстановке, при вынужденной посадке, полете в грозовых облаках, при отказе двигателей.

Более экономичной является автоматическая система подавления взрыва. Датчик в баке реагирует на световое излучение пламени и включает впрыск огнегасительного состава. Ограниченное применение имеет химический способ желатинизации топлива, уменьшающей опасность взрыва при аварии. Аварийная система защиты вводит в топливо вещества, образующие студенистую массу. Разработаны и другие способы защиты от взрыва: эмульгирование топлива, заполнение баков пористым материалом, в том числе содержащим коагулятор для отверждения поропласта в случае пробоя стенок бака и предотвращения вытекания топлива.

**2.6.7. Тушение пожара в наземных емкостях ГСМ.** Большие пожары в резервуарах с топливами тушат химической и воздушно-механической пеной. Менее эффективно тушение распыленной водой, совсем неэффективно воздействие струй воды. При отсутствии специальных средств тушения в начале пожара можно попытаться погасить подачей к горячей поверхности холодного топлива из нижних слоев емкости.

При тушении небольших пожаров используют подручные средства – кошку, песок, землю и др.



## Глава 3

### ТОПЛИВА ГТД (РЕАКТИВНЫЕ ТОПЛИВА)

#### 3.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ

**3.1.1. Топливо как источник теплоты.** Привычное понятие топлива, как *вещества, сжигаемого с целью получения тепловой энергии*, обычно подразумевает широко используемые в технике и в быту горючие вещества – нефтепродукты, уголь, древесину, горючие газы и другие, при горении которых окислителем служит кислород атмосферного воздуха. Они представляют собой главный источник необходимой человечеству энергии. Воздух, который при их использовании является окислителем, считать составной частью топлива не принято.

Но более строгий и точный научный термин *топливо* определяет его как совокупность веществ, при взаимодействии которых выделяется теплота, используемая для работы двигателей, для отопления и выполнения других технических и технологических задач. Применительно к *химическим* топливам, выделяющим теплоту в окислительно-восстановительной реакции горения, топливом должна считаться совокупность горючего и окислителя (такая трактовка принята применительно к ракетным топливам, окислитель которых находится на борту ЛА). Химическим топливом также считается сложное вещество, выделяющее теплоту при разложении на простые (например, пероксид водорода) или при соединении свободных атомов и радикалов в молекулы.

Принципиально иной тип топлив – *ядерные* (или *атомные*), выделяющие огромную энергию (в том числе тепловую) при распаде или при синтезе атомных ядер, в данной книге не рассматривается.

**3.1.2. Роль топлива в авиационном двигателе.** Размещаемые на борту ЛА и расходуемые авиационными двигателями химические, главным образом – углеводородные топлива, вырабатываемые из нефти, выделяют тепловую энергию при горении. Она сообщается газообразному рабочему телу, состоящему из воздуха и продуктов сгорания топлива. С помощью рабочего тела тепловая энергия преобразуется двигателем в механическую работу отброса газовой струи или вращения воздушного винта, создающих силу тяги.

Кроме основного назначения – выделения энергии топлива в той или иной мере служит поставщиком рабочего тела двигателя. В газотурбинных и поршневых двигателях основным источником рабочего тела является воздух, а доля топлива по массе, равная  $1/(1+\alpha L_0)$ , составляет до 6,5%. Продукты сгорания топлива  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (с учетом присоединения кислорода воздуха) составляет до 28% массы газа, выходящего из двигателя. При стехиометрическом составе топлива с воздухом это обеспечивает получение каждым килограммом рабочего тела до 2800 кДж и максимальное повышение температуры газа примерно на  $2100^\circ\text{C}$ . Реальное же использование этих предельных значений ограничено допустимыми параметрами рабочего процесса авиационного двигателя и обычно в несколько раз меньше указанных величин.

Топливо также используется как хладагент в теплообменниках для охлаждения масла, в поршневых двигателях в охлаждающих рубашках цилиндров и прямого испарительного охлаждения внутренних двигателей цилиндра. Кроме

того, топливо может служить сигнальной рабочей жидкостью для выдачи команд на включение и выключение форсирования двигателя и других устройств.

**3.1.3. Классификация реактивных топлив.** Для топлив, на которых работают авиационные ГТД и ПВРД, установилось общее наименование *реактивные топлива*. Примерная схема их классификации приведена на рис. 3.1.

Отечественные авиационные ГТД рассчитаны на применение топлив типа керосина – среднестиллятных нефтяных фракций, значительная часть которых не требует специальной очистки и переработки. Крупномасштабное производство таких топлив обеспечено сырьем и производственными мощностями общего народнохозяйственного назначения. Это весьма существенно, поскольку самолеты и вертолеты с ГТД являются массовым видом военной и транспортной техники, отличающимся большими затратами энергии на осуществление полета и, следовательно, высокими расходами топлива и большими единичными заправками (30-70% стартовой массы).

В сравнении с другими углеводородными топливами массового производства керосины имеют важные преимущества. Им свойственна более высокая плотность и меньшая летучесть, чем бензинам и сжиженным газам, что выгодно в плане лучшего использования ограниченных емкостей ЛА и обеспечения высотности топливных систем. Более высокая теплота и полнота сгорания керосина по сравнению с более тяжелым дизельным топливом и, тем более, мазутом способствует обеспечению экономичности ГТД и увеличению полезной нагрузки ЛА.

Помимо обычных авиакеросинов применяются термостабильные керосины, подвергнутые гидроочистке (обработке водородом) для уменьшения отложений и коррозии в топливной ГТД. Для самолетов с числом  $M = 2,5-3$  предназначены утяжеленные (высококипящие) авиакеросины, получаемые путем глубокой химической переработки тяжелых дистилляторных фракций и газойля некоторых нефтей. Органическое применение в отечественной практике, но более значительно в ВВС США имеет широкофракционное топливо (смесь керосина и бензина).

Перспективными топливами ГТД, ПВРД, и ВРД специальных схем считаются синтетические индивидуальные углеводороды и их смеси, криогенные топлива – жидкий метан (сжиженный природный газ), жидкий водород. Менее вероятно, но в принципе возможно применение гидридов бора и азота, спиртов, суспензий и органических соединений металлов (алюминия, магния и др.) По сравнению с нефтяными топливами одни из них дают больше тепла в расчете на единицу веса или объема топлива, другие – на единицу количества прокачиваемого через двигатель воздуха.

### **3.2. ТОПЛИВО КАК ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСА ТЯГИ**

**3.2.1. Удельный импульс.** Основное функциональное свойство реактивного топлива – обеспечение реактивного полета необходимой энергией. Осуществление полета в течение заданного времени требует затраты определенного количества топлива. Его химическую энергию силовая установка ЛА преобразует в тепловую энергию, а затем в механическую работу газовой струи (рабочего тела), создающую требуемую силу тяги.

Чем большую тягу в единицу времени удастся получить при расходе каждого килограмма топлива (или, что по существу то же самое, больше времени

СУ будет развивать необходимую тягу), тем меньше нужно топлива для выполнения полетного задания. Следовательно, эффективность топлива по его основному функциональному свойству определяется произведением силы тяги на время расходования единицы массы топлива. Эта величина называется *удельным* или *единичным импульсом*  $J_{уд}$  или  $J_{ед}$  (как известно, импульс силы в физике – это произведение величины силы на время ее приложения). Размерность удельного импульса Н·с/кг=м/с. С другой стороны, удельный импульс представляет собой величину, обратную удельному расходу топлива (секундному)  $J_{уд} = 1/C_{уд \text{ сек}}$ , так как размерность  $C_{уд \text{ сек}}$  кг топлива / Н·с. Следовательно, удельный импульс связан с удельной тягой силовой установки:  $P_{уд} = J_{уд}/g_T = J_{уд} \alpha L_0$ , где  $g_T = G_T/G_B = 1/\alpha L_0$  – отношение секундных расходов топлива и воздуха,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха,  $L_0$  – стехиометрический коэффициент.

**3.2.2. Эксергия.** Согласно второму началу термодинамики тепловой двигатель преобразует в полезную механическую работу не всю тепловую энергию, выделяемую при сжигании топлива. Помимо потерь от неполноты сгорания, теплоотдачи в стенки и потерь полученной механической работы из-за трения, значительная часть тепловой энергии уходит в окружающую среду с выхлопными газами. Наибольшая полезная работа при подводе теплоты  $Q$  к рабочему телу получается путем принудительного изменения его состояния по циклу Карно, который состоит из двух изотерм и двух адиабат. Она называется *эксергией* :

$$Ex = q(1 - T_{oc}/T_r) = q\theta \quad (3.1)$$

где  $T_r$  – температура источника теплоты (в стехиометрическом двигателе – температура горения);  $T_{oc}$  – температура окружающей среды, до термодинамического равновесия с которой доводятся продукты сгорания;  $\theta = 1 - T_{oc}/T_r$  – к.п.д. цикла Карно, иначе – коэффициент Карно .

Эксергия характеризует максимальную работоспособность рабочего тела или, условно, топлива, которое определяет исходное состояние рабочего тела. Выражение (3.1) применительно к топливу определяет максимальную возможность превращения теплотворности в механическую работу реактивной струи:

$$Ex = H_u \theta \quad (3.1')$$

Величина  $\theta$  при работе СУ на разных топливах и даже на одном и том же топливе неодинакова, она в принципе зависит не только от природы и состава топлива, от устройства и совершенства двигателя, но и от  $T_{oc}$  (зима, лето, полет у земли или в стратосфере). Выбор условий и вытекающая из этого величина коэффициента Карно определяется конкретной задачей. В частности, можно увеличить эксергию за счет лучшего охлаждения турбины, повышения температуры  $T_r$  и, соответственно, коэффициента Карно  $\theta$  [5].

**3.2.3. Тяговый коэффициент использования эксергии.** Эффективность использования эксергии для повышения удельного импульса зависит от схемы и параметров СУ, прежде всего от того, насколько рационально они сочетаются со свойствами топлива (примеры см. с. 4.3.1).

Баланс эксергии и удельного импульса можно выразить уравнением  $Ex = g_T (H_u \theta) K_{ex}^2 = c_c^2/2$ , где  $K_{ex}$  – тяговый коэффициент использования эксергии, зависящий от свойств топлива и совершенства двигателя;  $c_c$  – скорость ис-

течения газа из сопла двигателя на расчетном режиме и, соответственно,  $c_c^2 / 2$  – кинетическая энергия 1 кг рабочего тела на срезе сопла.

При работе на месте, то есть при нулевой скорости полета

$$J_{уд} = c_c^2 / g_T = K_{ex} \sqrt{2\alpha L_0 H_u \theta} \quad (3.2)$$

а в полете при скорости  $V > 0$

$$J_{уд} = K_{ex} \sqrt{2\alpha L_0 H_u \theta} (1 - V/c_c) \quad (3.2')$$

Следует обратить внимание на то, что даже при  $K_{ex}=1$  удельный расход топлива нельзя считать обратно пропорциональным теплотворности, ее влияние более слабое (что вполне соответствует известной из физики квадратичной связи между эксергией и количеством движения или импульсом силы):  $C_{уд} = 1/J_{уд} = [K_{ex} \sqrt{2\alpha L_0 H_u \theta}]^{-1}$ , то-есть  $C_{уд} \sim 1/\sqrt{H_u}$ . Но к влиянию теплотворности добавляется влияние стехиометрического коэффициента топлива:  $C_{уд} \sim 1/\sqrt{L_0}$ . В полете влияние  $H_u$  и  $L_0$  на  $J_{уд}$  и  $C_{уд}$  ослабляется еще значительней, поскольку с увеличением скорости полета  $V$  величина  $c_c$  возрастает медленней и множитель  $(1 - V/c_c)$  уменьшается.

В связи с этим возрастает роль коэффициента использования эксергии  $K_{ex}$ , который возрастает при рациональном оборудовании СУ дополнительными устройствами (турбодетандером, теплообменниками и др., см. с. 4.3.1) оптимизации распределения хладоресурса силовой установки и оптимизации параметров ее рабочего процесса.

### 3.2.4. Влияние удельного импульса на потребную заправку топлива.

Доля массы топлива  $m_T$  в составе стартовой массы ЛА  $m_0$ , то есть величина  $\xi_T = m_T/m_0$  при выполнении одинакового полетного задания одним и тем же или сходным ЛА, уменьшается при уменьшении удельного расхода топлива  $\hat{C}_{уд}/C_{уд} \varepsilon < 1$ . Согласно импульсному подходу к анализу реактивного полета, развитому В.С. Пышновым [23] на основе второго закона Ньютона, затрачиваемый на полет интегральный импульс тяги при этом одинаков  $\hat{I}_T = I_T$  (условно его называют интегральным импульсом топлива). Его выражение позволяет найти уменьшенную потребную долю топлива  $\xi_T$  при меньшем удельном расходе топлива  $C_{уд}$

$$I_T = \int_0^\tau P d\tau / m = \int_{m_0}^{m_0 - m_T} J_{уд} dm / m = J_{уд} \ln[m_0 / (m_0 - m_T)] = \sum I_{Ti} \quad (3.3)$$

где  $\tau$  – время полета,  $m$  – переменная масса ЛА, убывающая вследствие расхода топлива,  $P$  – тяга двигателя,  $\sum I_{Ti}$  – расход импульса топлива на участках разгона, набора высоты, горизонтального полета и маневров (поскольку расход топлива  $G_T = -dm/d\tau$ , удельный импульс  $J_{уд} = P/G_T$ , то  $P d\tau = -J_{уд} dm$ ).

Следовательно

$$\hat{J}_{уд} \ln[\hat{m}_0 / (\hat{m}_0 - \hat{m}_T)] = J_{уд} \ln[m_0 / (m_0 - m_T)] \text{ или } (m_0 - m_T)/m_0 = [(\hat{m}_0 - \hat{m}_T / \hat{m}_0)]^\varepsilon,$$

где  $\varepsilon = \hat{J}_{уд} / J_{уд}$ , откуда уменьшенная потребная доля топлива

$$\hat{\xi}_T = 1 - (1 - \xi_T)^\varepsilon, \quad -\Delta m_T = \hat{\xi}_T m_0 - \xi_T m_0 = m_0 (\hat{\xi}_T - \xi_T) \quad (3.4)$$



Уменьшение массы топлива позволяет на эту же величину увеличить массу полезной нагрузки  $\hat{m}_H = -(-\Delta m_T)$ .

### 3.3. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНОГО ТОПЛИВА И ТРЕБОВАНИЯ К НЕМУ

**3.3.1. Условия в топливной системе ЛА и топливной аппаратуре ГТД.** Факторы, характеризующие условия применения реактивного топлива в ЛА и определяющие требования к его свойствам, представлены на рис. 3.2. Минимальная температура топлива, определяемая климатическими условиями и охлаждением топлива в дозвуковом полете на большой высоте, около  $-60^{\circ}\text{C}$ . В сверхзвуковом полете топливо может нагреться в баках и теплообменниках до  $100-200^{\circ}\text{C}$ , что способствует потерям топлива от испарения, возникновению кавитации в топливной системе самолета, паровоздушных пробок, перебоев в работе подкачивающих и перекачивающих насосов, окислению содержащихся в топливе нетермостабильных веществ с образованием твердых осадков. Переходящий в надтопливное пространство при наборе высоты растворенный кислород увеличивает пожарную опасность в случае боевых повреждений или разрядов статического электричества, а при нагреве выше  $200^{\circ}\text{C}$  создает опасность самовоспламенения паров топлива.

Перед поступлением в двигатель топливо, как правило, проходит через фильтр низкого давления и теплообменник (топливо-масляный радиатор).

Фильтр низкого давления служит для защиты насосов и регуляторов подачи топлива от твердых частиц, случайно появившихся в топливной системе извне или вследствие износа. Применение топлива, загрязненного механическими примесями, содержащего кристаллы льда или воду, приводит к забиванию фильтра, снижению его пропускной способности и отказу в работе двигателя.

Топливная аппаратура двигателя выполнена по высокому классу точности, с зазорами порядка 7-10 мкм, с каналами сечением в десятые доли миллиметра. Даже небольшие отложения и коррозия могут нарушить ее нормальную работу. В теплообменнике температура топлива повышается на  $20-40^{\circ}\text{C}$ , а в некоторых условиях (например, при снижении самолета) на  $80-100^{\circ}\text{C}$ . Во избежание загрязнения топливной автоматики продуктами окисления, образующимися в нагретом топливе, в высокотемпературных двигателях насос-регулятор установлен перед теплообменником, рассчитанном на работу при давлении до 10 МПа. Работа агрегатов топливной аппаратуры зависит также от *вязкости* топлива. Повышенная вязкость при низкой температуре приводит к большим нагрузкам насоса, может замедлить работу некоторых регулирующих устройств, ухудшает распыл топлива форсунками.

Смазочные свойства топлива в насосе мало зависят от вязкости, определяющим их фактором является наличие в топливе поверхностноактивных веществ.

**3.3.2. Условия в камере сгорания и газовом тракте.** Топливо, впрыскиваемое в камеру сгорания, попадает в поток сжатого воздуха с температурой  $300-500^{\circ}\text{C}$  или же еще более горячих продуктов сгорания, подсасываемых в сторону форсунки, и быстро испаряется, перемешивается с воздухом и поджигается горячими газами. Это позволяет не предъявлять особых требований к испаряемости топлива. Однако при повышении вязкости с укрупнением капель



замедляются прогрев и испарение топлива, впрыснутого в камеру сгорания, снижается полнота сгорания, ухудшается запуск, усиливается нагарообразование. При запуске двигателя условия для испарения не благоприятны, так как в камеру сгорания поступает холодный воздух. В связи с этим в некоторых двигателях пусковым топливом служит легко испаряющийся бензин.

Детали газового тракта, даже при использовании самых совершенных способов их охлаждения, работают при температурах, близких к максимально допустимым для современных жаростойких материалов. Ввиду этого они весьма чувствительны к газовой коррозии и перегреву. Вредным для их надежности является связанное с углеводородным составом топлива образование сажи в пламени, которое усиливается по мере повышения давления в газовом тракте двигателя с ростом сверхзвуковых скоростей. Оно вызывает ряд вредных последствий – усиление теплового излучения факела пламени, нагарообразование, науглероживание поверхности металлов и эмалей, что может привести к перегреву и разрушению камер сгорания и других узлов и деталей горячей части двигателя. Кроме того, оно способствует демаскировке летательных аппаратов в боевых условиях дымным следом и инфракрасной контрастностью.

**3.3.3. Общие требования к реактивному топливу.** В самом общем виде требования к реактивному топливу сводятся к тому, чтобы его свойства в этих условиях возможно лучше обеспечивали создание, сохранение и эффективное использование запаса энергии на борту ЛА, протекание процессов подачи топлива и смесеобразования, сгорания и удаления продуктов сгорания из ГТД, не вызывая при этом его загрязнения, износа, коррозии, перегрева, а при наземном обслуживании авиационной техники – неудобств или опасности обращения с топливом. Применительно к нефтяным реактивным топливам конкретных сортов требования выражаются в форме официально регламентированных стандартами или техническими условиями показателей физико-химических свойств, а также некоторых эксплуатационных свойств (см. 11.1.1. и таблицы 1,2 справочных материалов).

**3.3.4. Требования к свойствам, влияющим на летно-технические характеристики и боевую живучесть ЛА.** Плотность и теплота сгорания не менее установленной нормы. Начало кипения не ниже установленной температуры или давление насыщенного пара не более установленной нормы (это требование связано с взрывоопасностью топливных баков после выработки из них топлива). Ограниченная растворимость кислорода.

Ограничение образования и излучения дисперсного углерода (имеет значение также в плане обеспечения боевой живучести ЛА, поскольку они повышают визуальную и тепловую контрастность ЛА).

**3.3.5. Требования к свойствам, влияющим на работу и надежность топливной системы ЛА и топливной аппаратуры ГТД.** Физическая однородность – отсутствие механических примесей (твердых включений) и эмульсионной воды или кристаллов льда, а также содержание установленного количества противоводокристаллизационной присадки (зимой и при высотных дозвуковых полетах).

Температура начала кристаллизации углеводородов не выше установленной нормы.

Давление насыщенного пара не выше нормы (для топлив, содержащих бензиновые фракции).

Достаточные смазочные свойства – оцениваются по износу топливной аппаратуры, а для топлив с противоизносной присадкой по кислотности не менее установленной нормы.

Неопасный уровень коррозионного действия на контактирующие с топливом металлы – массовая доля меркаптановой серы и кислотность не более установленной нормы и отсутствие сероводорода, свободной серы (по испытанию на медную пластинку), водорастворимых кислот и щелочей.

Неопасный уровень действия на контактирующие с топливом неметаллические материалы – резину, пластмассы, герметики (оценивается путем специальных испытаний); отсутствие или неопасное количество твердых и смолистых отложений на контактирующих с топливом поверхностях – достаточная термостабильность (оценивается по ряду показателей в статических и динамических условиях).

Не более установленной нормы концентрация фактических смол и йодное число (как показатель содержания непредельных углеводородов, являющихся одним из источников образования отложений).

**3.3.6. Требования к свойствам, влияющим на процесс горения, на надежность камер сгорания и деталей газового тракта.** Вязкость при низкой температуре не более установленной нормы, выкипание в пределах установленных температур, отсутствие отложений на контактирующих с газами поверхностях.

Ограниченное образование и невысокая интенсивность излучения дисперсного углерода (сажи) – высота некоптящего пламени и люминометрическое число не менее установленной нормы (индекс черноты диффузионного пламени не более установленной нормы).

Массовая доля ароматических углеводородов (которые считаются ответственными за нагаро- и сажеобразование) не более установленной нормы.

Неопасный уровень газовой коррозии – общее содержание серы не более установленной нормы, отсутствие микропримеси ванадия, молибдена и некоторых других металлов, окислы которых интенсифицируют газовую коррозию.

**3.3.7. Требования к свойствам, влияющим на удобство и безопасность наземного обслуживания.** Безотказная фильтруемость (с целью обеспечения требуемого уровня показателей физической однородности, указанных выше).

Ограниченная огнеопасность – температура вспышки не ниже установленной нормы (это же требование связано с взрывоопасностью топливных баков после выработки из них топлива).

Электрическая проводимость в пределах установленных норм (для топлив с антистатической присадкой).

Невысокий уровень токсичности жидкого топлива, его паров и продуктов сгорания.

**3.3.8. Ограниченная возможность выполнения всех требований.** Степень влияния различных свойств топлива не одинакова, а в ряде случаев четко не определена. Некоторые показатели обоснованы применительно к одним ти-

пам ГТД и недостаточно – к другим.

Реальные топлива, как правило, не обладают всем комплексом желательных свойств. Сами свойства взаимно связаны (рис. 3.3), так как в конечном счете определяются только химическим составом топлива и, следовательно, обусловлены сортом нефти, технологией ее переработки, присадками. Улучшение одних свойств иногда сопровождается ухудшением других, и высокий уровень по всем показателям практически не может быть реализован. При этом свойства, влияющие на летно-технические показатели ЛА, как правило, должным образом обеспечиваются углеводородной природой топлива, а предъявление высоких требований необходимо в первую очередь по тем свойствам, которые влияют на надежность авиационной техники, обеспечивают безаварийность полетов. Они в значительной мере зависят от неуглеводородных примесей, содержащихся в топливе. По остальным, практически менее существенным свойствам обычно предъявляют, лишь минимальные требования, либо вообще их не предъявляют, имея в виду, что топливо должно быть возможно более дешевым и недефицитным.

### 3.4. СТАНДАРТНЫЕ СОРТА РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ

**3.4.1. Авиационные керосины.** Топливо умеренной термостабильности марки ТС-1 и термостабильное марки РТ типа керосина применяются на отечественных самолетах и вертолетах с ГТД почти всех типов. Топливо ТС-1 непригодно только для небольшого числа типов самолетов с высокой скоростью или значительной продолжительностью сверхзвукового полета, а топливо РТ допущено на ЛА всех типов, в том числе и тех, которые рассчитаны на применение более тяжелых термостабильных топлив марок Т-6 или Т-8В, вырабатываемых в ограниченном количестве. В нормативных документах применение топлива РТ предусмотрено в качестве основной марки, а топлива ТС-1 – в качестве дублирующей (см. 11.2.6), однако по масштабам и практике применения важнейшим является топливо ТС-1.

Сырьем для производства топлив ТС-1 и РТ служат нефти западносибирских, урало-волжских и других месторождений. Первоначально топливо ТС-1 вырабатывалось только из сернистых нефтей Татарстана, Башкортостана и других месторождений урало-волжского района, в связи с чем в его марку и введена буква С – сернистое, в отличие от марки Т-1, которая была основной в первые годы становления реактивной авиации. Среднедистиллятная фракция, получаемая прямой перегонкой нефти при производстве топлива РТ, обычно имеет несколько более высокие температуры начала и конца кипения, чем при производстве топлива ТС-1 (рис. 3.4), что практически никак не отражается в эксплуатации.

Чтобы получить термостабильное топливо и уменьшить до установленной нормы (не более 0,001%) содержание меркаптановой серы, дистиллят при производстве топлива РТ, как правило, подвергают гидроочистке (обработке водородом) в паровой фазе при температуре 400<sup>0</sup>С и давлении 5-7 МПа с использованием катализатора MoS<sub>2</sub>:  $C_nH_{m-1}SH + H_2 \rightarrow C_nH_m + H_2S$ , и сероводород удаляют щелочной очисткой.

Для компенсации снижения смазочной способности, обусловленного уда-

лением поверхностноактивных гетероорганических веществ при гидроочистке, к топливу РТ добавляется присадка нафтенных кислот (0,003-0,004%), а для компенсации удаленных при гидроочистке естественных фенольных антиокислителей добавляется присадка ионола (0,002 - 0,004%). При производстве топлива ТС-1 с менее жесткой нормой по меркаптановой сере (не более 0,005%, а со знаком качества не более 0,003%) гидроочистку применяют только при необходимости и частично, чтобы сохранить природные смазочные агенты и антиокислители.

Топлива РТ и ТС-1 имеют одинаковую норму плотности не менее 775 кг/м<sup>3</sup> и мало различаются по остальным физическим свойствам, а также по большинству эксплуатационных свойств, за исключением термостабильности и коррозионной активности [29]. Топлива обеих марок практически равноценны в пределах установленного ресурса эксплуатации той авиационной техники, которая отработывалась на топливе ТС-1. Однако на отдельных типах техники при увеличении ее ресурса по фактическому состоянию топливо РТ может иметь преимущества.

На всех типах самолетов, которые эксплуатируются на топливе ТС-1, до 80-х гг. применялось также топливо Т-1 из бакинских и сахалинских малосернистых нефтей со значительным содержанием нафтенных углеводородов и, благодаря этому, более высокой плотностью по сравнению с марками ТС-1 и РТ (не ниже 800 кг/м<sup>3</sup>), а также с хорошей смазочной способностью. Существенные недостатки этого топлива – низкая термостабильность, выражающаяся в образовании твердых отложений в агрегатах топливной системы на сверхзвуковых самолетах, склонность к нагарообразованию и интенсивное излучение пламени. Ввиду этого и учитывая, что нефти, из которых получается это топливо, в основном иссякли, поставка его авиации практически прекращена, однако использование не запрещено.

При эксплуатации тех типов сверхзвуковых самолетов, которые рассчитаны на применение только термостабильных топлив, марка РТ является наиболее доступной, хотя и не обеспечивает такой максимальной дальности и продолжительности полета, как утяжеленные Т-6 и Т-8В. Для обеспечения работоспособности топливных систем и предотвращения потерь топлива при интенсивном нагреве, свойственном сверхзвуковому полету, для топлива РТ установлено ограничение температуры начала кипения по нижнему пределу – не ниже 135° С, но оно недостаточно в условиях длительного полета с числом  $M = 2,5-3$ .

**3.4.2. Термостабильные утяжеленные топлива.** Для самолетов с числом  $M = 2,5-3$  специально предназначены высококипящие топлива Т-8В и Т-6.

Термостабильное топливо Т-8В с повышенной плотностью – не менее 800 кг/м<sup>3</sup> – получается примерно по такой же технологии, как топливо РТ, но из среднестиллятной фракции с более высокой температурой начала кипения – не ниже 165°С.

Термостабильное топливо Т-6 имеет наиболее высокую плотность из стандартных отечественных и зарубежных авиационных топлив не менее 840 кг/м<sup>3</sup>, а по диапазону температур выкипания – близко к дизельному топливу (температура начала кипения не ниже 195° С, выкипания 98% до 315° С). Оно вырабатывается путем химической переработки – глубокого гидрирования тяжелых дистиллятных фракций некоторых нефтей и газойля, получаемого при вакуумной перегонке мазута. При этом из ароматических (в том числе бицикли-



ческих) углеводородов в результате насыщения водородом получают нефтени, а массовая доля ароматических углеводородов не превышает 10%. Это, а также отсутствие нестабильных и коррозионно-активных веществ обеспечивают наиболее эффективное использование топливных емкостей ЛА, нормальную работу топливных систем при нагреве до 100-150° С и выше, и удовлетворительные (хотя и не лучшие) показатели, связанные с образованием свободного углерода при горении. Высокая вязкость топлива Т-6 при отрицательных температурах не позволяет использовать его на тех двигателях, топливная аппаратура которых рассчитана на керосин обычной вязкости.

**3.4.3. Резервное широкофракционное топливо.** В качестве резервного для ряда двигателей предусмотрено топливо Т-2 широкого фракционного состава – смесь керосина с бензином, начало кипения которой не ниже 60° С. По сравнению с керосинами оно имеет меньшую плотность (но не ниже 755 кг/м<sup>3</sup>) и малую вязкость, худшие смазочные свойства и более высокое давление насыщенного пара (до 133 гПа), способствующее возникновению кавитации в топливной системе самолета. По коррозионным свойствам оно обычно не отличается от топлива ТС-1. Вследствие недостатков топлива Т-2 оно допущено к применению не на всех типах ГТД, а для ряда двигателей при его использовании установлены сокращенные сроки службы топливных насосов. Некоторым самолетам при работе на топливе Т-2 в случае высокой температуры топлива в жаркую погоду установлено ограничение по высоте полета (не более 12000м).

**3.4.4. Зарубежные топлива ГТД.** Применяемые в США и западноевропейских странах топлива авиационных ГТД можно разбить на четыре группы: авиакеросины типа AVTUR, нелетучие авиакеросины типа AVCAT, термостабильные авиакеросины и широк офракционные топлива типа AVTAG.

Авиакеросины типа AVTUR (Aviation Turbine Fuel) имеют плотность 770-820 кг/м<sup>3</sup> при 20° С, конец кипения несколько выше, чем у отечественных авиакеросинов, – до 288-300° С (см. рис. 9.3); по температуре начала кристаллизации уступают отечественным сортам, а по остальным показателям существенно не отличаются от них. К этой группе топлив относятся западноевропейские сорта AVTUR /50 или АТК и AVTUR /40 с температурой замерзания соответственно не выше –50° С и –40° С; американские сорта JP-8 и JetA1 с температурой замерзания не выше –48° С, JetA – не выше –38° С. Эти авиакеросины могут быть использованы взамен сортов ТС-1 и РТ с ограничением по низким температурам, а в случае фактической температуры начала кристаллизации –50° С или ниже – без ограничений.

Нелетучие авиакеросины типа AVCAT более низкого фракционного состава рассматриваются прежде всего как безопасные в пожарном отношении. Они предназначены для авиации ВМФ, базирующейся на авианосцах. Топлива этого типа отличаются от авиакеросинов типа AVTUR несколько большей плотностью 784-842 кг/м<sup>3</sup> при 20° С и температурой вспышки не ниже 60°С. К этой группе топлив относятся американский сорт JP-5 с температурой замерзания не выше –46° С и английские сорта AVCAT /40 и AVCAT /48 с температурой замерзания соответственно не выше –40° С и –48°С. Они могут быть использованы взамен топлив Т-6 и Т-8В при фактическом соответствии их качества техни-



ческим нормам на эти сорта, за исключением температуры начала кристаллизации, исходя из которой устанавливаются ограничения по применению топлива при низких температурах.

Термостабильные авиакеросины американских сортов JP-6 и JP-7 предназначены для сверхзвуковых самолетов. Их контролируют по термостабильности при более высоких температурах, чем остальные реактивные топлива. Для сорта TS установлены нормы плотности при 20° С в пределах 764-797 кг/м<sup>3</sup>, для сорта T-6 776-836 кг/м<sup>3</sup>, для сорта JP-7 – 776-802 кг/м<sup>3</sup>, температура замерзания не выше –55° С. Они могут быть использованы взамен термостабильного топлива PT, а также вместо сорта TC-1.

Топлива широкого фракционного состава типа AVTAG (G – gasoline, бензин) представляют собой смесь бензина (до 65%) и керосина. Их плотность 748-798 кг/м<sup>3</sup> при 20°С, т.е. может быть ниже, чем у советского широкофракционного топлива Т-2, а давление насыщенного пара при 38° С в пределах 137-205 гПа – выше, чем сорта Т-2. К этой группе относятся английский сорт AVTAG или ATG и американские сорта JP-4 и JetB (последний из топлив этой группы с температурой замерзания не выше –48°С, остальные – не выше –60°С). Широкофракционное топливо JP-4 в течение ряда лет было основным сортом военной авиации США и достаточно широко используется до настоящего времени. Применять топлива типа AVTAG можно только на тех типах отечественных самолетов и вертолетов, где допускается сорт Т-2, и при условии, что фактическое давление насыщенного пара при 38° С не превышает 133гПа – норму, установленную для сорта Т-2.

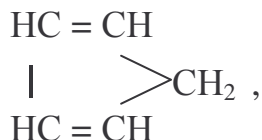
При производстве топлив стран НАТО может вводиться присадка, предотвращающая образование кристаллов льда, – метилцеллозольв в количестве 0,10-0,15%, а также другие присадки – ингибитор коррозии, деактиватор металла (снижающий каталитическое влияние металла на окисление топлива), антикоррозионная и антикристаллическая присадки.

### **3.5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТОПЛИВА КРЫЛАТЫХ РАКЕТ**

**3.5.1. Специфика требований.** Беспилотная крылатая ракета одноразового действия с дальностью полета в несколько тысяч километров должна быть обеспечена топливом высокой энергоемкости, обладающим большим запасом энергии на единицу объема. Это позволит получить большую дальность полета без увеличения габаритов топливных баков и соответственно при меньшем аэродинамическом сопротивлении. При дозвуковой или относительно небольшой сверхзвуковой скорости полета отпадает проблема высоких требований к термостабильности топлива, относительно малая продолжительность работы топливной аппаратуры снимает проблему высоких требований к смазочной способности топлив, к их коррозионной пассивности. Отсутствие личного состава на борту допускает возможность использования токсичных топлив – разумеется при условии герметичных (например, капсульных) устройств заправки.

**3.5.2. Углеводородные топлива высокой энергоемкости.** По данным иностранных источников наиболее выгодные углеводородные топлива для крылатых ракет получают на основе ди- и трициклопентадиенов (смесь их гидрированных изомеров).

Компактность структуры циклопентадиена, ячейки которого входят в состав молекул этих топлив,



обеспечивает их высокую плотность: топливо RJ-4 – 920 кг/м<sup>3</sup>, RJ-5 (Shellldine-H) – 1080 кг/м<sup>3</sup>, их энергоемкость соответственно 39,5 и 41,0 МДж/л, что в среднем на 20-25 % выше энергоемкости авиакеросинов. Температура конца кипения около 3000С. Высокая вязкость этих топлив при отрицательных температурах требует специального устройства топливopодающей аппаратуры.

**3.5.3. Соединения бора и суспензии металлов.** Близко по энергоемкости к тяжелым углеводородам, несмотря на низкую плотность (630 кг/л) бороводородное соединение – петнаборон B<sub>5</sub>H<sub>9</sub>, температура кипения которого 62<sup>0</sup>С, замерзания минус 47<sup>0</sup>С. Как индивидуально, так и в комбинации с более тяжелыми бороводородами пентаборан может обеспечить наиболее высокую дальность полета крылатых ракет. Пентаборан чрезвычайно ядовит, это одна из важнейших причин, препятствующих его использованию.

В таблице 2.1 приведены данные по энергоемкости некоторых металлов. Если в авиакеросин ввести в виде суспензии 25-30% по объему алюминия, энергоемкость смесового топлива будет увеличена примерно на 50%; еще резче повлияет добавка более дорогого металла бериллия или бора. Вопрос о целесообразности применения тех или иных топливных композиций решается в соответствии с поставленной задачей.

### 3.6. СВОЙСТВА ТОПЛИВА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛА

**3.6.1. Факторы, определяющие влияние топлива.** Свойства топлива в той или иной мере оказывают влияние на основные летно-технические характеристики ЛА (рис. 3.2). На рисунке приведены также факторы, связанные с влиянием топлива на боевую живучесть ЛА. Они существенно влияют на максимальную дальность и продолжительность полета и на грузоподъемность через зависящий от них бортовой запас топлива, его удельный расход, полетную массу ЛА, а также в связи с потерями топлива от испарения. Некоторое, обычно не учитываемое, влияние они оказывают на взлетные характеристики через начальную полетную массу и тягу ГТД на взлете. Хотя влияние свойств топлива на максимальную высоту полета (потолок) через максимальную тягу ГТД и полетную массу ЛА невелико, но при определенных условиях потолок резко уменьшается из-за паровых пробок и кавитации в топливной системе. Большей частью воздействие свойств топлива на летно-технические характеристики ЛА имеет характер ограничений, но в отдельных случаях может обеспечить их улучшение.

Перечисленные выше факторы, непосредственно влияющие на летно-технические характеристики ЛА, зависят от небольшого числа свойств топлива: плотности, теплоты сгорания, испаряемости (давления насыщенного пара или отражающих его показателей – температуры вспышки, начала или 10% перегонки). В меньшей степени сказывается влияние растворимости воздуха, теплоемкости топлива и продуктов его сгорания, а в исключительных случаях и нагароотложения (см. 3.8.2).

**3.6.2. Плотность и энергоемкость топлива.** Плотность реактивных топлив (см. 3.3), определяемую массой вещества в единице объема  $\rho = G/V$ , кг/м<sup>3</sup>, в стандартах и паспортах указывают при температуре 20°C. Практическое значение, как правило, имеет плотность топлива при той температуре, которую оно имеет при заправке ЛА, а в некоторых случаях при высокой температуре, достигаемой в сверхзвуковом полете. С изменением температуры на величину  $\Delta t$  изменение плотности топлива  $\Delta \rho = -\gamma \Delta t$ , где температурная поправка плотности на 1°C для топлив  $\gamma = 0,7-0,9$  кг/м<sup>3</sup>·°C. Для точных расчетов значение поправки  $\gamma$  берется из стандартных таблиц. При ориентировочном расчете можно считать, что понижение температуры на каждые 10°C увеличивает плотность топлив приблизительно на 1%. При выполнении более точных расчетов и для настройки топливной аппаратуры рекомендуется использовать следующие наиболее вероятные значения плотности при 20°C: для топлива ТС-1 – 780 кг/м<sup>3</sup>, РТ – 778 кг/м<sup>3</sup>, Т-8В – 804 кг/м<sup>3</sup>, Т-6 – 841 кг/м<sup>3</sup>, а для резервного топлива Т-2 – 766 кг/м<sup>3</sup>. Теплота сгорания  $H_u$  для этих топлив имеет следующие наиболее вероятные значения: ТС-1 и Т-8В – 43,29 МДж/кг, РТ – 43,37 МДж/кг, Т-6 – 43,16 МДж/кг, Т-2 – 43,23 МДж/кг [30].

Располагаемый запас энергии на борту ЛА, т.е. максимальное количество тепла, которое может быть получено в течение полета за счет сгорания топлива, равно произведению расходуемого объема баков на плотность топлива и на его теплоту сгорания  $V\rho H_u$ . В этом выражении произведение  $H_u \rho$  представляет собой *энергоемкость* топлива – количество энергии, выделяемое при сгорании 1м<sup>3</sup> топлива. Оно существенно для определения емкости баков при конструировании ЛА. Низкую энергоемкость имеют широкофракционные топлива (Т-2 при стандартной температуре – 32640 МДж/м<sup>3</sup>), более высокую – авиационные керосины ТС-1 и РТ – 33750 МДж/м<sup>3</sup>, еще выше – утяжеленный керосин Т-8В – 34800 МДж/м<sup>3</sup>, наибольшую – топливо высокой плотности Т-6 – 36250 МДж/м<sup>3</sup>. Это объясняется тем, что с утяжелением фракционного состава плотность, как правило, возрастает более резко, чем уменьшается удельная теплота сгорания. [15]. Аналогичное влияние оказывает увеличение содержания ароматических углеводородов: они обладают на 10-15% большей плотностью, чем углеводороды других групп, и на 4-6% меньшей теплотой сгорания.

Так как плотность топлив изменяется с температурой, энергоемкость также зависит от их температуры. В диапазоне от +40° до –40° С она возрастает на 7-8%. Для повышения дальности или продолжительности полета желательно, чтобы топливо перед полетом имело возможно более низкую температуру. В связи с этим летом целесообразно хранить топливо в заглубленных емкостях и не допускать его нагрева на солнце в цистернах топливозаправщиков и баках летательных аппаратов. Зимой же лучше хранить топливо в наземных емкостях и возможно дольше перед заправкой выдерживать в цистернах спецавтомобилей.

**3.6.3. Особенности влияния энергоемкости топлива на дальность полета.** Однако при эксплуатации летательных аппаратов не следует считать, что дальность полета пропорциональна энергоемкости топлива, и во всех случаях оказывать предпочтение топливу с более высокой плотностью, не учитывая его меньшую теплоту сгорания. Воздействие плотности и теплоты сгорания топлива на летно-технические характеристики летательного аппарата неравноценно.

Оно связано с конструктивными и эксплуатационными факторами и в различных случаях проявляется по-разному. Дальность полета всегда пропорциональна теплоте сгорания топлива, но не зависит от его плотности в случае ограничения заправки топлива по массе.

В тех же случаях, когда баки заправляются полностью, дальность полета не пропорциональна плотности топлива, а зависит от нее или менее резко (при одном и том же полезном грузе) или более резко (при соответственно одинаковой начальной полетной массе).

Анализ влияния теплотворности и плотности топлива на летно-технические характеристики летательного аппарата основан на уравнении импульсов (3.3), составляемом с учетом конструктивных факторов и изменения массы летательного аппарата в полете [23].

При неизменной массе полезной нагрузки  $m_n = \text{const}$  увеличение бортового запаса топлива за счет его плотности  $m_t = V_t \rho$  приводит к увеличению полетной массы летательного аппарата и, следовательно, к повышению километрового расхода топлива. Иначе говоря, часть увеличенного запаса топлива затрачивается на перевозку его самого, и дальность полета возрастает за счет плотности по логарифмической зависимости меньше, чем исходная масса топлива на борту ЛА. (рис. 3.5). При этом конкретные данные по влиянию плотности топлива на дальность полета зависят от того, какой объем баков приходится на единицу массы самолета, не заправленного топливом. Так, при относительной емкости баков  $1 \text{ м}^3 / \text{т}$  повышение плотности на 5% от 800 до 840  $\text{кг}/\text{м}^3$  дает увеличение дальности на 2,7%, а при относительной емкости баков  $0,5 \text{ м}^3 / \text{т}$  – на 3,8%. Понижение плотности на 5% до 760  $\text{кг}/\text{м}^3$  дает уменьшение дальности полета соответственно на 3,0 и 4,0%.

Если полет производится с одинаковой начальной полетной массой  $m_0 = \text{const}$ , то увеличение массы топлива за счет его плотности сопряжено с уменьшением полезной нагрузки  $-\Delta m_n = \Delta \rho V_t$ , конечной массы летательного аппарата  $m_k = m_0 - V_t \rho$  и, следовательно, средней полетной массы и километрового расхода топлива. В этом случае зависимость дальности полета от плотности более резкая. Изменение плотности топлива на 5% при условии  $m_t = \text{const}$  обеспечивает изменение дальности полета на 6,5-8%.

Таким образом, роль плотности топлива наиболее существенна, при полете на максимальную дальность с ограниченным полезным грузом.

Аналогичное влияние плотность и теплота сгорания топлива оказывают на максимальную продолжительность полета, а также на возможности выполнения любых боевых задач.

**3.6.4. Потребный запас топлива.** Масса топлива на борту летательного аппарата, необходимая для полета на заданную дальность по одинаковой программе (маршруту и профилю), не зависит от плотности топлива, если только емкость баков достаточна для его размещения. Для уменьшения потребной заправки всегда выгоднее топливо с большей теплотой сгорания  $H_u$ .

В наиболее типичном случае, при перевозке на заданное расстояние одного и того же полезного груза  $m_n = \text{const}$ , увеличение  $H_u$  позволяет сократить не только потребную массу, но и необходимый запас энергии на борту летатель-



ного аппарата (рис. 3.6,а). Это объясняется уменьшением начальной полетной массы за счет сокращения бортового запаса топлива. В случае  $\xi_T = 0,5-0,75$  его можно снизить на 1,5-2% при изменении теплотворности на 1%.

Если сохранить неизменной начальную полетную массу  $m_0 = \text{const}$ , корректируя полезный груз, то влияние  $H_u$  на потребный бортовой запас топлива, разумеется, будет менее резким (рис. 3.6,б). Ее повышение на 1% в этом случае дает экономию топлива только на 0,5-0,7% при  $\xi_T = 0,5-0,75$ , но одновременно получается выигрыш в полезном грузе на 0,3-0,5% от начальной полезной массы, что на тяжелом самолете достаточно существенно. Примерно такой же проигрыш получается при уменьшении удельной теплоты сгорания на 1%.

Таким образом, при полете на заданную (не максимальную) дальность или ограничении бортового запаса топлива по массе не нужно стремиться применять дефицитные тяжелые авиакеросины, лучше использовать доступные топлива с меньшей плотностью и большей теплотворностью.

**3.6.5. Влияние испаряемости топлива на дальность полета.** Некоторое влияние на дальность полета могут оказать потери топлива в полете через дренаж баков. Испарение топлива с поверхности в баках ЛА практически несущественно. Но испарение может привести к потере нескольких процентов от исходного количества топлива при выделении растворенного воздуха с подъемом на высоту. Масса растворенного воздуха в топливе уменьшается пропорционально понижению давления в топливных баках. Избыток воздуха выделяется в виде пузырьков, насыщенных парами топлива.

Объем выделяемого воздуха достаточно велик, он может достигать нескольких сотен литров на каждые 1000 л топлива (если учитывать расширение воздуха вследствие уменьшения давления с высотой).

Элементарный объем выделяемого воздуха  $dV = -\frac{dp_H}{p_H} V_p$ , где  $V_p$  – объем растворенного воздуха. При постепенном снижении давления от  $p_0$  до  $p_H$  весь выделенный объем (увеличивающийся по мере роста высоты)

$$V_{\text{непрер}} = -\int_0^H \frac{dp_H}{p_H} V_p = V_p \ln \frac{p_0}{p_H}. \quad (3.5)$$

Выделение из топлива избыточного воздуха при наборе высоты, как правило, запаздывает, особенно при большой скороподъемности. На некоторой высоте (обычно не ниже 8000 м) это приводит к кратковременному вскипанию топлива. В этом случае одновременно выделяется объем воздуха

$$V_{\text{одновр}} = V_p (p_0/p_H - 1) \quad (3.6)$$

Масса потерянного через дренаж топлива пропорциональна объему выделяемого воздуха ( $V_{\text{непр.}}$  или  $V_{\text{одновр.}}$ ) и плотности насыщенного пара топлива, которая равна:  $\rho_{\text{нп}} = p_{\text{нп}} \mu_T / R_{\text{ун}} T_T$ , где  $p_{\text{нп}}$  – давление насыщенного пара топлива, кПа;  $\mu_T$  – молекулярная масса легких фракций топлива,  $R_{\text{ун}} = 8,314$  кДж/кмоль·К;  $T_T$ , К – фактическая температура топлива и его паров.

**3.6.6. Влияние испаряемости топлива на максимальную высоту полета.** Ограничение максимальной высоты полета на топливе с высоким давлением



насыщенного пара (в том числе – повысившимся в результате нагрева топлива в полете) может быть связано с опасностью кавитации в топливной системе самолета: разрывов и парогазовых пробок в потоке жидкого топлива, колебаний давления, перебоев в подаче. Происходящая при выделении воздуха кратковременная кавитация в трубопроводах, вызывающая колебание давления топлива, не представляет практической опасности, если только она не явится поводом к неправильным действиям экипажа. Когда же в ходе набора высоты внешнее давление понижается настолько, что оказывается равным или меньше давления насыщенного пара, испарение топлива внутри пузырьков становится очень интенсивным, пузырьки резко расширяются, начинается кипение.

В отдельных участках топливной системы самолета давление может быть ниже внешнего давления (например, на входе в подкачивающие и перекачивающие насосы). Кавитация в этих участках трубопровода начинается на меньшей высоте, чем кипение топлива в баках. При кавитации по трубопроводам движется сжимаемая смесь жидкости с газами и парами топлива. В ней легко возникают резкие пульсации давления, которые вызывают износ насоса, колебания и перебои в расходе топлива, вплоть до прекращения его подачи.

Следует иметь в виду, что образование воздушно-паровых пробок, запирающих подачу топлива центробежными насосами из расходных баков, может иметь также иную причину виброперегрузки. Ее воздействие вызывает захват воздуха с поверхности топлива, проникновение в него множества мелких воздушных пузырьков, которые группируются в воздушно-паровые пробки.

Опасное с точки зрения кавитации давление насыщенных паров при открытой топливной системе может быть у топлив широкого фракционного состава в летнее время (133 гПа при 38° С и при более высокой температуре). Важнейшие меры против кавитации – применение топлив с низким давлением насыщенных паров, защита топлива от нагрева солнечными лучами, устройство закрытых топливных систем с повышенным давлением, увеличение рабочего давления (кавитационного запаса) подкачивающих и перекачивающих насосов. Они особенно необходимы для самолетов с большими сверхзвуковыми скоростями полета, когда нагрев топлива может вызвать резкое повышение давления насыщенного пара в ходе полета и соответствующее понижение допустимой высоты полета. Однако избыточное давление в топливной системе не устраняет кавитацию, а отодвигает ее до больших высот и более высоких температур топлива (рис. 9.5). Высокое давление насыщенного пара при повышении температуры топлива в баках до 80-100° С требует увеличения прочности и жесткости баков.

В случае заполнения топливных баков инертным газом картина кавитации в принципе не изменяется, но высота полета, на которой возникает кавитация, может сместиться в ту или иную сторону. Так, при использовании углекислого газа, растворимость которого в топливе примерно втрое больше по сравнению с воздухом, возникает вероятность кавитации на меньших высотах. Применение азота может задержать начало кавитации до большей высоты по сравнению с воздухом, который содержит значительную долю кислорода, лучше растворяющегося в топливе.

**3.6.7. О влиянии свойств топлива на тягу двигателя.** Как правило, свойства топлива не влияют на величину силы тяги (мощности) ГТД, а следовательно, и на скорость полета. При большей теплотворности или большей плотности топлива насос-регулятор, обеспечивающий заданную программу регулирования, (например,  $T_3^* = \text{const}$  или  $n = \text{const}$ ,  $\pi_T = \text{const}$ ,  $T_\Phi = \text{const}$ ) подает меньший объем топлива. Расход топлива на обычных режимах ( $\alpha > 1$ ) автоматически устанавливается таким образом, чтобы в единицу времени выделялось одно и то же количество тепла, что обеспечивает получение одной и той же тяги (в соответственно равных прочих условиях). Положительный эффект более высокой теплотворности и плотности скажется на дальности полета и других факторах, зависящих от импульса силы тяги, но не на тяге.

Однако регуляторы некоторых двигателей имеют такие конструктивные особенности, которые делают их чувствительными к свойствам топлива. Так, на турбовинтовых двигателях АИ-20 и НК-12 различных модификаций командно-топливные агрегаты дозируют топливо по объему. Пропорционально плотности и теплотворности изменяется часовой расход топлива и в соответствии с характеристикой двигателя – его тяга. При существенном изменении плотности топлива необходимо произвести перенастройку гамма-корректора, имеющегося на командно-топливном агрегате этих двигателей. При работе форсажного насоса некоторых типов ТРДФ на упоре максимальной производительности количество выделяемого тепла и, следовательно, тяга двигателя выше на топливах с более высокой плотностью или теплотворностью.

На таком режиме максимального форсажа, который достигается при стехиометрическом соотношении топлива и воздуха ( $\alpha = 1$ ) без разбавления продуктов сгорания избыточным воздухом, тяга ТРДФ почти не зависит от состава и свойств реально применяемых углеводородных топлив, но по иной причине: из-за их практически одинаковой теплопроизводительности, то есть равного количества тепла, которое дают углеводородные топлива на 1 кг рабочего тела независимо от их конкретного химического состава (см. 2.2.7). То же относится и к прямоточным ВРД, работающим на углеводородном топливе при  $\alpha = 1$ .

### **3.7. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВ, КОТОРЫЕ ПРОЯВЛЯЮТСЯ В ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМАХ ЛА И ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЕ ГТД**

**3.7.1. Внешнее загрязнение топлива.** Наибольшее число отказов и неисправностей топливных агрегатов ЛА и ГТД, относящихся к качеству топлива, обусловлено не его природой, выбор и соответствие которой определены многочисленными исследованиями, испытаниями и опытом эксплуатации, а загрязнением, внешним по отношению к топливу. Вредное воздействие на топливную аппаратуру оказывают не только те загрязнения, которые видимы невооруженным глазом, но и невидимые микрозагрязнения. При отсутствии взвешенных или осевших частиц размером больше 25-30 мкм (предел разрешающей способности глаза при ярком боковом освещении), 1л топлива содержит тысячи – десятки тысяч частиц размером  $20 \pm 5$  мкм, сотни тысяч частиц размером  $10 \pm 5$  мкм, много миллионов еще меньших частиц порядка 1-5 мкм.

Состав частиц, их форма, твердость, адгезия на поверхности различных материалов весьма разнообразны. Происхождение частиц трудно установить:

часть их попадает из перерабатываемой нефти, какая-то доля представляет собой технологические загрязнения из заводского, складского, транспортного, заправочного оборудования, атмосферную пыль почвенного и промышленного происхождения, являются продуктами коррозии или износа насосов, разрушения неметаллических материалов (прокладок, рукавов, фильтров), образуются вследствие коагуляции смол и других нестабильных веществ, образующихся из самого топлива, результатом жизнедеятельности микроорганизмов.

Для прецизионных элементов топливной аппаратуры с зазорами порядка 5-10 мкм наиболее опасны частицы такого же размера. При попадании в зазоры они препятствуют нормальной работе топливорегулирующих устройств, могут заклинить их. Более мелкие частицы вызывают износ трущихся пар, более крупные засоряют каналы форсунок, липкие частицы образуют отложения в дроссельных пакетах и других дозирующих устройствах. Фильтры внутри топливной системы, предназначенные для защиты от вредного воздействия микрозагрязнений, сами забиваются при большом количестве частиц преимущественно того масштаба, который имеют поры фильтровального материала. Поэтому система наземной очистки топлива должна предусматривать удаление основной массы этих и, естественно, всех более крупных частиц (как правило, не препятствующих прокачке топлива).

Вопрос о допустимом количестве микрозагрязнений достаточно сложен и противоречив. Официальных норм на него в отечественной практике не устанавливалось. Обычно указываемый желательный предел содержания микрозагрязнений не более 2 г/т (то есть 0,0002%), с одной стороны, достигается с большим трудом путем многократной фильтрации в сочетании с другими мерами. С другой стороны, он влечет введение примерно 1 кг загрязнений за 100 ч полета на фильтр и в топливные агрегаты летательного аппарата (по расчету). При этом не учитывается вероятность забивки этими загрязнениями фильтров, зависящая от преобладающего размера частиц и наличия ПАВ в топливе, тормозящего его прокачку. Интересным решением проблемы может быть применение присадок, коагулирующих микрозагрязнения в крупные частицы, легче поддающиеся фильтрации.

**3.7.2. Кристаллы льда, образующиеся в топливной системе.** В зимний период, при температуре топлива ниже  $0^{\circ}\text{C}$  (а при длительных высотах полетов – и летом), в нем могут появляться кристаллы льда. Они забивают топливный фильтр двигателя перед насосом и резко снижают его пропускную способность, что приводит к отказу двигателя. Появление кристаллов льда в топливе может быть вызвано как образованием их в самой топливной системе ЛА, так и заправкой ее топливом, уже содержащим кристаллы льда. Разумеется, последнее совершенно недопустимо (вопрос о соответствующих мероприятиях при подготовке топлива к заправке рассматривается в п.3.2, часть их способствуют предотвращению образования кристаллов льда и в самой топливной системе ЛА).

В топливе растворено небольшое количество воды; ее растворимость уменьшается с понижением температуры топлива (рис. 3.9) и внешнего давления. При охлаждении топлива, например, в холодную погоду при заполнении наземных емкостей теплым топливом из подземных резервуаров или летом в

дозвуковом полете на большой высоте избыток воды выделяется в виде мелких капелек, которые при отрицательной температуре замерзают. При этом мельчайшие капельки воды переходят из метастабильного жидкого состояния в кристаллическое только при контакте с твердой поверхностью, прежде всего на топливном фильтре перед насосом.

**3.7.3. Осадкообразование и термостабильность топлива.** Основной проблемой, возникающей в результате нагрева топлива в полете, связанного как со сверхзвуковыми скоростями полета, так и с воздействием высоких температур на топливо со стороны горячих элементов силовой установки (например, находящегося в форсажном насосе при выключенном форсаже), являются осадкообразование, наиболее интенсивное в пределах температуры 130-200<sup>0</sup>С (рис. 3. 10). Стойкость топлива к осадкообразованию при высоких температурах называется *термической стабильностью*. Термостабильность ухудшается под влиянием непредельных углеводородов и гетероорганических примесей: твердые нерастворимые в топливе осадки являются конечными продуктами их окисления, полимеризации и химической конденсации. При использовании недостаточно термостабильных топлив (например, сортов ТС-1) на горячих поверхностях (особенно бронзовых), соприкасающихся с жидким топливом, образуются твердые нагароподобные отложения, а в массе топлива – взвесь мельчайших твердых частиц, которые забивают фильтры, попадают в каналы и зазоры топливной аппаратуры. В дренажных отверстиях осадки иногда откладываются в виде рыхлой массы.

Для предотвращения осадкообразования производится гидроочистка топлива от источников нестабильности, например, при выработке термостабильности сортов РТ, Т-8В. Однако глубокая очистка топлива может вызывать ухудшение его термостабильности вследствие удаления естественных антиокислителей (дисульфидов, фенолов и др.), что приводит к необходимости введения *антиокислительной присадки*, например, ионола (он полезен также для защиты резины от разрушения при контакте с топливом).

Другим способом повышения термостабильности топлив может быть применение специальных присадок, препятствующих осадкообразованию. Такая присадка в сочетании с противоизносным компонентом применяется в составе некоторых топлив типа Т-8В и РТ под наименованием *сигбол*. Термостабильность топлив может быть повышена также путем их обескислораживания и насыщения азотом перед заправкой.

**3.7.4. Фрикционный износ топливных насосов.** Смазочные свойства топлив определяются в основном его поверхностной активностью: способностью топлива или каких-либо содержащихся в нем веществ адсорбироваться на поверхности металла. Тем самым предотвращается "оголение" и сухое трение деталей топливного насоса на участках высокого контактного давления, выжимающего жидкость из зазора.

Твердым телам свойственно высокое поверхностное натяжение, и на их поверхности, находящейся в контакте с многокомпонентной жидкостью, адсорбируются те вещества, которые его понижают. Физический механизм адсорбции на твердой поверхности состоит в электростатическом взаимодействии полярных молекул (имеющий разнесенный электрический заряд), а иногда и ио-



нов жидкости с электрическим полем частиц, образующих твердую поверхность, например, положительно заряженных ионов металла (рис. 3.12).

Углеводороды топлива неполярны и практически не защищают трущиеся детали топливных насосов от фрикционного износа. Из веществ, которые естественно могут содержаться в реактивном топливе, поверхностно-активными являются смолы, органические кислоты и другие кислородсодержащие соединения, а также сераорганические и азоторганические соединения, т.е. те вещества, присутствие которых вредно с точки зрения термической стабильности и коррозионных свойств топлива. Глубокая очистка топлива от этих веществ резко усиливает износ. Так, гидроочищенное топливо РТ без присадки вызывает в несколько раз больший износ, чем топливо сорта ТС-1, которое вырабатывается из того же сырья. Оптимальным является содержание примеси или присадки гетероорганических соединений в топливе, которое достаточно для обеспечения смазки насосов и не опасно с точки зрения осадкообразования и коррозии.

Некоторое влияние на износ оказывает также вязкость топлива. В состав менее вязких топлив входят вещества с меньшей молекулярной массой, молекулы которых имеют меньшие размеры и, следовательно, меньший дипольный момент. Поэтому при одинаковой степени очистки и отсутствии противоизносных присадок меньше прочность образуемой или граничной пленки. Кроме того, с уменьшением молекул повышается средняя скорость их хаотического теплового движения, способствующего разрушению (десорбции) граничной пленки.

Существенное улучшение смазочных свойств реактивных топлив достигается путем введения нескольких тысячных или сотых долей процента поверхностно-активной присадки, молекулы которой обладают большим дипольным моментом. Введение 0,003% присадки нафтенных кислот в гидроочищенное топливо РТ компенсирует ухудшение противоизносных свойств, вызванное его "переочисткой".

**3.7.5. Коррозионные свойства топлива.** Опасное для регулирующих узлов топливной аппаратуры загрязнение студенистыми продуктами коррозии происходит в тех случаях, когда топливо содержит недопустимое количество меркаптановой серы или органических кислот, что может быть следствием нарушений технологии производства или упущений в контроле качества топлива. Другие органические соединения, содержащие серу или кислород, не проявляют коррозионной активности в жидкой фазе.

При существующей системе производства и контроля качества реактивного топлива в нем практически исключается примесь особо агрессивных веществ, способность испортить поверхность трущихся элементов топливной аппаратуры – свободной серы, сероводорода, водорастворимых кислот или щелочей. Однако некоторые из таких веществ могут образовываться уже внутри топливной системы летательного аппарата в результате жизнедеятельности микроорганизмов. *Микробиологическая коррозия* может иметь место в условиях значительной влажности и относительно высокой температуры топлива (30-35<sup>0</sup>С), наиболее благоприятных для развития бактерий и спор плесневых грибов, которые практически всегда находятся в нефтепродуктах. Их интенсивное размножение происходит на поверхности контакта топлива с водой, на влаж-



ных стенках топливных емкостей самолета, отстойника, дренажа. В процессе биологического обмена веществ они выделяют кислые органические вещества и, возможно, сероводород и серную кислоту, которые могут вызвать серьезные повреждения, особенно при длительном воздействии внутри застойных участков топливной системы (вплоть до появления течи кессонных баков). Кроме того, бактериальная масса может вызвать загрязнение автоматики, забивку фильтров.

Основными мерами борьбы с микробиологической коррозией являются регулярный слив и контроль отстоя, тщательная промывка систем (особенно в условиях тропического климата), а также применение *биоцидных* присадок к топливу. Известно, что биоцидное действие оказывает жидкость "И".

### **3.8. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВ, КОТОРЫЕ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ПРИ СЖИГАНИИ В ГТД**

**3.8.1. Огневое воздействие.** Топливо при сжигании в ГТД оказывает три вида воздействия на камеру сгорания, узлы и детали газового тракта: огневое (нагрев), загрязняющее (нагар) и химическое (газовая коррозия). Хотя они в какой-то мере взаимосвязаны, но различаются по физико-химическому механизму и последствиям. Свойства топлив, влияющие на эти воздействия, связанные с ними процессы и опасные явления, которые возможны при низком качестве топлив или неисправностях техники, перечислены на рис 3.13.

В современных ГТД с высокими параметрами рабочего процесса наиболее серьезные проблемы обусловлены огневым воздействием. Оно заключается в интенсивном лучистом переносе энергии от пламени к стенкам сгорания и, в меньшей мере, к поверхности других частей газового тракта. При неблагоприятных условиях излучение пламени может быть причиной перегрева, коробления, появления трещин и прогаров, термической усталости с внезапным разрушением камеры сгорания.

Главным источником огневого воздействия является образующийся при диффузионном горении, а затем быстро газифицируемый в пламени дисперсный углерод (сажа), нагретый до температуры горения (см. 2.2.8). Роль конвективной теплоотдачи продуктов горения при наличии заградительного слоя воздуха у стенок невелика и мало зависит от свойств топлив. Поскольку для обеспечения устойчивой работы современных ГТД необходимо хотя бы часть топлива сжигать по диффузионному механизму, так как только при диффузионном горении самопроизвольно создаются стехиометрические зоны  $\alpha = 1$  (см. 2.3.5), избавиться от сажи – обязательного спутника диффузионного горения – нереально.

При этом время существования каждой частицы сажи порядка 1-2 микросекунд, концентрация сажи в пламени имеет квазистационарный характер.

По закону Вина электромагнитное излучение частиц сажи, степень черноты которых близка к единице, имеет максимум энергии при длине волны, обратно пропорциональной температуре

$$\lambda_{(\text{макс})} = 2898/T_c, \text{ мкм} \quad (3.7)$$

Из этого следует, что при температуре горения перенос энергии происходит преимущественно в инфракрасном диапазоне волн длиной 1-2 мкм. Он не ослабляется слоем воздуха, изолирующим стенки камеры сгорания от горючих газов.

Степень черноты факела достигает единицы, если квазистационарная концентрация сажи, (при которой число образующихся и газифицируемых частиц сажи равны), настолько велика, что модели светящихся сажистых частиц в пламени перекрывают друг друга. Газообразный факел при этом излучает, как сплошное твердое черное тело. Дальнейшее повышение концентрации сажи при неизменной температуре горения не усиливает излучения факела. Энергетическая плотность лучистого потока испускаемого абсолютно черным телом, определяется законом Стефана-Больцмана [4]. В виде, удобном для технических расчетов, она выражается формулой

$$E_0 = 5,668 \cdot (T/100)^4, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.8)$$

Ее зависимость от температуры излучающего тела представлена на рис. 3.14.

Концентрация сажи в пламени зависит от состава топлива (см.2.4.3). Если частицы сажи не перекрывают друг друга, их суммарное излучение меньше излучения сплошного черного тела. Степень черноты факела  $\varepsilon = E/E_0$  рассматривается как характеристика сажистости пламени, определяющей в конечном счете интенсивность огневого воздействия горящего топлива на газовый тракт.

С повышением давления воздуха перед камерой сгорания  $p_k^*$  сажистость пламени увеличивается и плотность лучистого потока растет вплоть до  $E_0$  практически для всех реальных углеводородных топлив, выше оно не может быть. На рис. 3.15 представлены экспериментальные данные по измерению энергии излучения факела в камере сгорания ГТД с помощью радиометра. Они показывают, что при использовании в качестве топлива толуола – ароматического углеводорода  $C_7H_8$ , плотность лучистого потока  $E_c$  с повышением давления  $p_k^*$  возрастала только до  $p_k^* \approx 0,7$  МПа. Прекращение дальнейшего ее повышения свидетельствует о достижении на этом топливе излучения черного тела. В тех же условиях, когда для ароматического углеводорода степень черноты  $\varepsilon = 1$ , для нафтенных углеводородов 0,70, для парафиновых – примерно 0,55. Для реальных реактивных топлив, представляющих собой смесь углеводородов этих трех групп, – от 0,65 до 0,80 (минимальные для марок ТС-1, РТ, а максимальные – для марки Т-6). При этом превалирующее влияние оказывают не ароматические углеводороды, а углеводороды других групп, составляющих 78-95% массы любого сорта авиакеросина.

Для оценки и регламентации качества топлива по принципу сажеобразования в диффузионном пламени, как исходного процесса формирования и вредного воздействия дисперсного углерода в реальных условиях эксплуатации, физически обоснованным и достаточно и достаточно достоверным показателем является определяемый на лабораторной горелке индекс черноты диффузионного пламени (ИЧДП), который пропорционален степени черноты и концентрации сажи [25]. Для большинства современных ГТД допустим ИЧДП топлива не более 70, что может соответствовать содержанию ароматических углеводородов в одних топливах 5-7%, а в других 30% и более.

Используемый за рубежом, а также в некоторых отечественных стандартах показатель излучения пламени *люминометрическое число* не имеет четкой фи-

зической интерпретации (за исключением той, что меньшее ЛЧ соответствует большему излучению пламени и, соответственно, худшему качеству топлива).

Обычно исключительную роль в образовании сажи, дыма, возникновении интенсивного излучения факела приписывают ароматическим углеводородам, поскольку добавление их к любому реальному углеводородному топливу, состоящему преимущественно из парафинов и нафтен, всегда увеличивает образование твердых углеродистых продуктов горения. Между тем анализ результатов испытаний всей совокупности реальных реактивных топлив приводит к парадоксу: имеет место обратная корреляция. Это объясняется тем, что действительный вклад ароматических углеводородов равен их ограниченной массовой доле, умноженной на степень черноты, равную единице, а углеводородов двух других групп – произведениям соответствующих значительно больших массовых долей на их степени черноты, вследствие чего вклад ароматических углеводородов в образование дисперсного углеводорода на фоне вклада других углеводородов не является решающим.

Ограничение содержания ароматических углеводородов в топливе не всегда позволяет снизить вредное для камер тепловое излучение факела. По мере повышения давления в газовом тракте двигателя, которое характерно для самолетов с большими сверхзвуковыми скоростями, сажеобразование усиливается и интенсивность излучения пламени любых реактивных топлив приближается к значениям, свойственным абсолютно черному телу. Одним из путей ее уменьшения является лучший подбор состава парафино-нафтенной части топлива, а также конструктивные мероприятия, обеспечивающие устойчивое кинетическое горение в ГТД.

**3.8.2. Загрязняющее воздействие продуктов сгорания.** Отложение на стенках и деталях камер сгорания твердого, но относительно рыхлого углеродистого нагара происходит, по-видимому, в результате осаждения сажи, образующейся в зоне пламени. Более плотный нагар является продуктом термического разложения и окислительной конденсации углеводородов, попавших на горячую поверхность термического разложения и окислительной конденсации углеводородов, попавших на горячую поверхность в составе капель жидкого топлива. Нагарообразованию способствует такая организация рабочего процесса в камере сгорания, при которой топливовоздушная смесь в передней части камеры переобогащена, а горящее жидкое топливо может забрасываться вихрями на стенки и детали камеры. Разложение и обугливание подтекающего топлива или конденсация сажи на торце форсунки приводят к образованию нагара у сопла форсунки, ухудшению распыла и искажению его конуса, что, в свою очередь, способствует попаданию жидкого топлива на стенки.

Наиболее склонны к нагарообразованию ароматические углеводороды, особенно бициклические. Нагарообразование усиливается при утяжелении фракционного состава топлива. При сочетании неблагоприятного состава топлива с недостатками рабочего процесса камер толщина нагара может достигнуть 20-30, мм и вызвать серьезные нарушения режима и эффективности работы двигателя, вплоть до недопустимого увеличения длины разбега. Низкая теплопроводность нагара приводит к неравномерному нагреву камер сгорания,

следствием которого могут быть коробление, трещины и прогар. Частицы нагара, отрывающиеся от стенок жаровой трубы, ударяются о лопатки турбины и вызывают их преждевременный износ (эрозию) или даже поломку.

Изучается возможность снижения нагарообразования не только посредством нормирования конца кипения и содержания ароматических углеводородов, но и с помощью присадок. Однако эффективно снижающие количество нагара металлорганические присадки резко усиливают теплоизолирующие свойства нагара, что вредно сказывается на надежности камер сгорания.

**3.8.3. Газовая коррозия.** Продукты сгорания углеводородов не вызывают коррозии в газовом тракте. Жаростойкие материалы, контактирующие с продуктами сгорания, не поддаются окислению содержащимся в них газообразным кислородом до максимальных рабочих температур. Коррозионной активностью в отношении этих материалов при определенных условиях обладают продукты сгорания имеющихся в топливе примесей серы, ванадия и, возможно, молибдена и некоторых других металлов.

Длительное коррозионное действие сернистого газа  $\text{SO}_2$  образующегося при сгорании всех соединений серы, может вызвать прогар лопаток турбины, если их температура превышает  $900-950^\circ\text{C}$ . Качество топлива в этом отношении характеризуется общим содержанием серы, достигающим в некоторых отечественных сортах (ТС-1, Т-2) 0,25%, а в зарубежных – 0,4%. Практически оно соответствует содержанию серы в виде неактивных соединений (сульфидов, тиофена), поскольку сера в активной форме (в составе меркаптанов, сероводорода, в свободном состоянии) допускается в количестве, на 2-3 порядка меньшем, во избежание коррозии топливной аппаратуры.

Микропримесь ванадия входит в состав главным образом высокомолекулярных азотсодержащих соединений, которые концентрируются в высококипящих фракциях нефти и в значительной мере удаляются при очистке нефтепродуктов. Однако остающееся ничтожно малое количество ванадия (0,00001-0,0001%), по-видимому, играет роль переносчика кислорода – катализатора газовой коррозии – и может быть непосредственной причиной коррозии и прогара жаростойких материалов. Образующийся после сгорания  $\text{V}_2\text{O}_5$  (температура плавления  $685^\circ\text{C}$ ) в жидком виде осаждается в газовом тракте и вследствие переменной валентности ванадия отщепляет атомарный кислород:  $\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{V}_2\text{O}_4 + \text{O}$ , который идет на окисление железа или никеля. При контакте с избытком кислорода в газовом тракте  $\text{V}_2\text{O}_4$  снова регенерируется в  $\text{V}_2\text{O}_5$ , опять распадается и т.д. Незначительное содержание в продуктах сгорания топлива сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  или оксида натрия  $\text{Na}_2\text{O}$  усиливает ванадиевую коррозию в десятки раз. Защиту камер сгорания от коррозии этого вида обеспечивают жаростойкими эмалями на основе оксидов хрома, но ее предотвращение в конечном счете достигается отбраковкой топлив при испытаниях.

### **3.9. СВОЙСТВА ТОПЛИВ, КОТОРЫЕ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ПРИ ИХ ХРАНЕНИИ И ОБСЛУЖИВАНИИ ПОЛЕТОВ**

**3.9.1. Условия хранения топлив.** Условия хранения на складах ГСМ, в особенности – длительного хранения влияют на стабильность и коррозионные свойства топлива. Окислительные процессы, приводящие к смолообразованию



и ухудшению термической стабильности, повышению кислотности, замедляются, если топлива хранятся при низкой температуре в заглубленных резервуарах, защищенных от прямого нагрева солнечными лучами. С целью уменьшения контакта свободной поверхности топлива с воздухом и суточного дыхания резервуара (обмена воздуха через дыхательные клапаны при суточном изменении температуры) его следует держать заполненным. Это относится и к хранению в топливной системе ЛА: в полных баках топливо портится медленнее.

Относительная площадь контакта топлива со стенками, которые играют роль катализатора окисления, зависит от размера емкости. Чем емкость крупнее, тем меньше вредный контакт каждого кубического метра топлива с металлом и дольше сохраняется нормальное качество топлива. Поэтому при закладке топлива на длительное хранение лучше использовать одну крупную емкость, чем несколько мелких.

По истечении установленного срока хранения топлива расходуют, а на хранение закладывают свежие. Сроки освежения для каждого вида ГСМ установлены в соответствии с их стабильностью и условиями хранения. Реактивные топлива в резервуарах и таре хранятся, как правило, в северной и средней климатических зонах до 5 лет, в остальных емкостях – до 10 лет, в южной – 4 года, а в баках самолетов в северной зоне – 2 года, в южной и средней – 6 месяцев. Плановый срок хранения сокращают, если склонные к изменению показатели качества ГСМ досрочно достигли предельно допустимых значений.

**3.9.2. Предотвращение образования кристаллов льда.** Появление кристаллов льда в топливе может быть вызвано тремя основными причинами: попаданием инея, конденсацией влаги из воздуха и выделением растворенной в топливе воды. При заполнении резервуара, цистерны или топливного бака самолета в топливо может попасть осевший на их стенках иней. Кроме того, иней, образовавшийся на стенках емкости выше уровня топлива, сползает в топливо при нагреве емкости солнечными лучами.

Из воздуха, проникающего в емкость через дыхательные клапаны или дренаж, на поверхности холодного топлива могут конденсироваться водяные пары; это происходит при наступлении теплой погоды. Конденсация продолжается в течение одних-двух суток, пока температура топлива не повысится. Образующиеся при этом мелкие кристаллики льда (типа снежинок) медленно оседают в топливо, оставаясь в нем длительное время во взвешенном состоянии (их плотность почти равна плотности холодного топлива).

Выделению кристаллов льда способствуют резкие колебания температуры топлива и воздуха.

Зимой перед заправкой топлива в баки, а также при длительном нахождении его в баках самолетов необходимо тщательно проверить, не появились ли в нем кристаллы льда. Наличие кристаллов льда в баках самолета обнаруживается при предполетной подготовке и перед вылетом путем слива и осмотра отстоя топлива, а на некоторых типах самолетов – при осмотре топливного фильтра после опробования двигателя.

**3.9.3. Применение противоводокристаллизационных жидкостей.** Эффективным средством против образования кристаллов льда являются противо-



кристаллизационные жидкости – этилцеллозольв (жидкость "И") и тетрагидрофурфуриловый спирт (жидкость "ТГФ"). Они не дают воде выпадать при понижении температуры топлива. Тетрагидрофурфуриловый спирт растворяется в холодном топливе медленней, чем этилцеллозольв, его не рекомендуется применять зимой в холодных районах. Кроме того, он менее стабилен и на практике неоднократно способствовал загрязнению фильтров нерастворимыми осадками. Поэтому использование его в последние годы ограничено. Жидкость "И" является основным сортом ПВКЖ, а жидкость ТГФ – дублирующим сортом. ПВКЖ добавляют в топливо в количестве 0,1-0,3% (1-3 кг на 1 т топлива), зимой – в зависимости от температуры воздуха (у земли): 0,1% при температуре до  $-20^{\circ}\text{C}$ ; 0,2% при температуре ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ ; 0,3% на некоторых типах самолетов круглый год. ПВКЖ способна удерживать в растворенном состоянии около 4% воды по отношению к количеству присадки, т.е. до 120 г на 1 т топлива, когда содержание присадки равно 0,3%. Допустимое содержание воды в обеих жидкостях (до добавки в топливо) не более 0,5%. Обводненную присадку применять нельзя, она может внести в топливо избыточную влагу и вызвать образование кристаллов. Обе жидкости ядовиты: пары их вызывают головную боль, а попадание в пищеварительный тракт – сильное отравление.

На большинстве типов ЛА топливо с добавкой ПВКЖ применяется только в зимнее время, а на транспортных и некоторых других типах самолетов, где возможно охлаждение топлива в полете, также и летом (в количестве 0,1%). Введение ПВКЖ в топливо производится на складах ГСМ (см. 11.5.3.) (например, при наливке цистерны группового заправщика) с помощью специальных дозаторов.

**3.9.4. Электризация топлива.** Во время наполнения резервуаров, цистерн топливозаправщиков и топливных баков ЛА происходит электризация топлива вследствие образования двойного электрического слоя при контакте с материалом фильтров и шлангов, а затем – сноса в емкость диффузных зарядов одного знака. Их носителями являются ионы, образующиеся при диссоциации примесей (например, воды, органических кислот). Напряженность электрического поля на поверхности топлива в баках может достигнуть нескольких тысяч вольт и вызвать мощный искровой разряд. Это происходит в результате накопления статического электричества из-за низкой электропроводимости топлива и обусловленного этим значительного времени релаксации заряда – взаимной нейтрализации зарядов топлива и стенки. Если температура топлива при наливке резервуаров, при подаче в цистерны или заправке самолетов и вертолетов выше взрывоопасного предела, то искровой разряд статического электричества может вызвать пожар.

Проблема электризации топлива усугубилась с повышением тонкости фильтрации, увеличением скорости налива и в результате мер по повышению термостабильности топлив. Топливо, очищенное от полярных гетероорганических соединений, имеет низкую электропроводимость, а некоторые из присадок, вводимые в топливо для улучшения его термостабильности и смазочных свойств, усиливают его электризацию.

В качестве меры против накопления статического электричества, его разряда и обусловленной этим пожарной опасности можно рекомендовать по воз-

возможности уменьшать скорость налива топлива. Кроме обычного заземления самолета и топливозаправщика следует соединять проводником заправочный кран с горловиной бака, но заземление и металлизация не обеспечивают полной нейтрализации топлива, хотя и сокращают время релаксации. Созданы, но еще не нашли широкого применения специальные устройства, нейтрализующие электростатические заряды непосредственно в процессе перекачки. Повысить электропроводимость топлива и ускорить релаксацию его зарядов можно путем введения в топливо *антистатической присадки сигбол*, содержащей органические соли хрома, (за рубежом применяется присадка ASA-3). Однако существенное повышение электропроводимости топлива вызывает искажение показаний топливомеров с индукционными датчиками, что может дезориентировать экипаж; поэтому топливо с антистатической присадкой контролируют не только по нижнему пределу электропроводимости (не менее 50 пСм/м при температуре заправки), но и по верхнему пределу электропроводимости (не более 600 пСм/м при 20°C).

При искровом разряде статического электричества и воздействии внешних источников воспламенения (зажигательных средств поражения, неосторожного обращения с огнем, разрушении электропроводки) топливо загорается только при температуре, превышающей температуру вспышки, когда над ним образуется достаточно богатая для воспламенения смесь паров топлива с воздухом. Так, пары над топливом Т-6 взрывоопасны, если температура топлива не ниже 60-65°C, РТ и ТС-1 – не ниже 15-25°C. Пары топлива Т-2, содержащего бензин, загораются начиная с температуры минус 10-20°C. При более низкой температуре воспламенения от искры или кратковременно поднесенного пламени не происходит.

Теоретически существует также верхний температурный предел воспламенения (около 100° С для Т-6, 55-65° С для РТ и ТС-1, 40-45° С для Т-2), при котором над топливом образуется чрезмерно богатая смесь, не способная загореться, причем нижний и верхний пределы воспламенения сближаются при понижении давления в баках с увеличением высоты полета. Однако сохраняется вероятность воспламенения топлива при температуре выше теоретического верхнего предела из-за выделения в атмосферу над топливом выделяемого из него растворенного кислорода при наборе высоты.

### **3.10. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ**

**3.10.1 Общий подход.** Эксплуатационные свойства реактивных топлив в настоящее время хорошо изучены не только по результатам многочисленных испытаний, но в еще большей степени на основе многолетнего опыта применения топлив. Известно, какие отказы и неисправности в работе техники и появление каких дефектов самой техники могут быть следствием воздействия физических и химических процессов, возникающих при контакте жидкого топлива с агрегатами и узлами топливной системы ЛА и топливной аппаратуры ГТД, при сжигании топлива и при контакте продуктов сгорания с агрегатами и узлами газозового тракта.

Привычное их определение при длительном испытании единичного двигателя каждого типа (на ресурс или на признанную достаточной для оценки топ-

лива часть ресурса) отнюдь не гарантирует выявление возможного в эксплуатации вредного воздействия испытываемого топлива, так как оно носит вероятностный характер. Нет технической возможности создать при таких испытаниях не только жесткие условия, в которых обязательно проявилось бы несоответствие качества, если оно присуще испытываемому топливу, по всем направлениям, требующим гарантии безопасности. Поэтому более эффективным и, кстати, во много раз более экономичным по затрате топлива и срокам проведения, являются испытания по комплексу методов квалифицированной оценки (КМКО) топлив авиационных ГТД. Каждый из методов комплекса рассчитан на создание таких условий испытания, которые позволяют четко установить пригодность топлива по одному или нескольким факторам взаимодействия топлива с авиационной техникой, а в комплексе – практически по всем факторам.

В утвержденном КМКО по каждому методу указываются какие организации им владеют: имеют необходимые для испытаний установки и другую аппаратуру, квалифицированные кадры для их проведения и выполняют работу во взаимодействии с другими уполномоченными на это организациями.

Квалификационные испытания опытных образцов топлив проводятся с целью обоснования решения о допуске их к производству и применению без проведения длительных стендовых и эксплуатационных испытаний. Вопрос о необходимости летных испытаний решается при возникновении сомнений в достоверности выявленных свойств топлив, которые могут повлиять на работоспособность техники в условиях маневрирования ЛА и связанных с этим перегрузок, включения и выключения форсирования двигателя, опасности самовыключения и особенностей запуска ГТД в полете.

Для подтверждения стабильности эксплуатационных характеристик производимого топлива предприятие-изготовитель должно производить периодические (не реже одного раза в год) испытания проб топлива на соответствие установленным требованиям КМКО.

**3.10.2. Квалификационные методы, характеризующие пригодность топлива в условиях работы топливной аппаратуры ГТД и топливной системы ЛА.** Определение термоокислительной стабильности в динамических условиях производится:

- на установке ДТС-1 М (80л топлива) определяют время (в часах) забивки контрольного фильтра до предельного перепада давления, изменение перепада давления на нем за 5 часов испытаний (в кПа) и цвет отложений на оценочной трубке на время испытаний (в баллах);

- на установке ДТС-2 (20 л топлива) определяют температуру начала образования отложений (для ТС-1 не ниже 800С, для РТ, Т-8В, Т-6 не ниже 1500С), индекс термостабильности (в условных единицах (соответственно не выше 6 и 2), скорость забивки контрольного фильтра (соответственно не более 500 и 200 Па/мин);

- на приборе ЦИТО – ММ в условиях циркуляции при температуре 250<sup>0</sup>С (0,65 л топлива) определяют скорость забивки контрольного фильтра по скорости повышения температуры в <sup>0</sup>С/час).

Определение противоизносных свойств топлив, содержащих противоизносную присадку, производится:

– на лабораторном стенде с узлом трения НР-21Ф33 (100 л топлива) определяют диаметр износа пятна шаров (в мм);  
– на стенде УПС-1 (3л топлива) определяют обобщенный показатель противозносных свойств;

– на приборе ПСТ-2 (2 л топлива) определяют показатель износа.

Оценка коррозионной активности производится по потере массы образца (в г/м<sup>2</sup>):

– в условиях конденсации воды по отношению к стали Ст-3 и бронзе ВБ-23НЦ (0,6л топлива);

– при повышенных температурах (0,5-0,6 л топлива) по отношению к меди и бронзе ВБ-23НЦ.

– Оценка воздействия на резины, применяемые в топливных агрегатах производится:

– по методу ЦИАМ (1 л топлива) определяется предел прочности (в кг/см<sup>2</sup>) и относительное удлинение (в %);

– по методу 25 ГНИИ МО РФ. В приборе ЦИТО-С (6 л топлива), определяется количество этапов нагрева, после которых резина сохраняет свою работоспособность.

Определение воздействия на тиоколовый герметик, применяемый для герметизации баков (1 л топлива): определяют отношение твердости после испытаний к исходной (в %).

**3.10.3. Квалификационные методы, характеризующие пригодность топлива в процессе сгорания.** Определение количества нагара производится:

– на однокамерной установке У-314 с испарительной форсункой (20 л топлива) определяется количеством нагара в %;

– на однокамерной установке со структурной форсункой (метод в/ч 26271 – ВНИИ НП, (60л топлива) определяется количество нагара в г);

– на установке УНТ-1 (метод 25 ГосНИИ МО РФ, 20 л топлива) определяется массовое нагарное число, дымное число и световое число.

Определение люминометрического числа (на стандартном аппарате с фитильной горелкой, 0,1л топлива), которое должно быть для топлив Т-1, РТ и Т-8В не менее 50, для топлива ТС-1 менее 55, для топлива Т-6 не менее 45.

Определение содержания металлов (являющихся катализаторами газовой коррозии при сжигании топлив, 0,01 л топлива), определяется содержание ванадия, кобальта, молибдена не более 10<sup>-5</sup> %.

**3.10.4. Квалификационные методы, характеризующие пригодность топлива при хранении и наземном обслуживании авиационной техники.** Определение стабильности при длительном хранении глубокоочищенных топлив, проходящих испытания по первому этапу (см. 11.2.4):

– химическая стабильность оценивается по методу ЦИАМ (0,6 л топлива) по времени, в течение которого концентрация ионола снижается до 0,002% масс. (в минутах);

– на приборе ЦИТО-М (60 л топлива) прогнозируются изменения термоокислительной стабильности при хранении по времени предварительного окис-

ления топлива при  $100^{\circ}\text{C}$  до полной забивки фильтра (в сутках);

– содержание присадки ионол определяется по индукционному периоду (0,15 л топлива в мин.);

– определяется удельная объемная электрическая проводимость топлив, получаемых с использованием ингибитора коррозии типа ИКБ-2 (0,15 л), которая должна быть не более 10 пСм/м.

**3.10.5. Квалификационные методы, характеризующие эффективность противоводокристаллизующих жидкостей.** Способность ПВКЖ растворять кристаллы льда в топливе (0,24л топлива; 0,002%л ПВКЖ) определяется по уменьшению массы кристаллов льда (в  $\text{мг/см}^3$ ).

Поверхностноактивные свойства ПВКЖ в топливе (0,01 л топлива, 0,005л ПВКЖ) определяются по поверхностной активности (в  $\text{мкНм}^2/\text{моль}$ ).

Способность ПВКЖ растворяться в топливе при отрицательных температурах (0,016л топлива; 0,001л ПВКЖ) определяется по показателю растворимости в процентном отношении.

Коррозионная агрессивность водных растворов ПВКЖ по отношению к конструкционным материалам (0,15л топлива; 0,15л ПВКЖ) определяются по содержанию железа и меди ( $\text{г/м}^3$ ).

Агрессивное воздействие ПВКЖ водных растворов ПВКЖ на тиоколовые герметики (0,3 л ПВКЖ) оценивается по набуханию и вымыванию герметика (в процентном отношении).

Сравнительная эффективность функционального действия ПВКЖ (0,05л топлива; 0,02л ПВКЖ) оценивается рангом эффективности.



## Глава 4

# КРИОГЕННЫЕ ТОПЛИВА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

### 4.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА КРИОТОПЛИВ

**4.1.1. Что такое криогенные топлива, зачем они нужны авиации.** Криогенные топлива, рассматриваемые в качестве перспективных энергоносителей для ЛА следующих поколений – это жидкий метан  $\text{CH}_4$  и жидкий водород  $\text{H}_2$  с температурами, соответственно,  $-162^\circ\text{C}$  и  $-253^\circ\text{C}$  и ниже, резко отличные от традиционного реактивного топлива – авиакеросина. Они представляют собой типичные криогенные жидкости (от греч. *kryos* холод + *genos* рождение), к которым принято относить сжиженные природные газы с температурой кипения ниже 120К (ниже  $-153^\circ\text{C}$ ).

Перспектива их применения в авиации обусловлена, во-первых, практически неограниченными возможностями их производства в условиях дефицита авиакеросина и назревающего энергетического кризиса. Во-вторых, их применение позволит существенно улучшить экологическую обстановку в атмосфере благодаря снижению в несколько раз выбросов вредных веществ в сравнении с нефтяным топливом, а также отсутствию опасности утечек в процессе транспортирования и хранения (при проливах они быстро и полностью улетучиваются). В третьих, особые свойства криотоплив открывают возможность повышения тактико-технических характеристик перспективных ЛА, недостижимого на традиционном нефтяном топливе. На применение криотоплив рассчитаны проекты гиперзвуковых и воздушно-космических самолетов.

Предполагается широкое применение сжиженного природного газа (СПГ), в составе которого примерно 95% составляет метан. Это может в 1,5-2 раза уменьшить расходы на авиационное топливо.

**4.1.2. Физический облик криотоплив.** На рис. 4.1 представлена диаграмма состояния водорода и метана в координатах  $p$ - $T$  (давление-температура) в логарифмическом масштабе. Области существования водорода и метана в жидкой фазе ограничены линиями равновесия с газовой и твердой фазами, которые при низком давлении смыкаются в тройной точке, а также критическими значениями температуры и давления, выше которых они не могут быть в жидком состоянии. При атмосферном давлении 0,1013 МПа температура кипения-ожижения водорода 20,3К [6], метана 111,7К, а температура плавления-кристаллизации водорода 11,2К, метана 90,7К.

Даже значительное повышение давления не позволяет существенно повысить температуру кипения с целью уменьшения потерь криогенного топлива и облегчения тепловой защиты стенок емкостей с жидким криогенным топливом. Выгодным может быть охлаждение топлива ниже температуры кипения, например, за счет теплоты испарения части топлива и повторного его ожижения с возвращением в емкость, а также активное термостатирование с небольшой затратой энергии от внешнего источника.

Плотность жидкого водорода при нормальной температуре кипения  $70,8\text{кг/м}^3$ , при нормальной температуре кристаллизации  $77,4\text{ кг/м}^3$  (на 9,3% больше), а после перехода в твердое состояние  $80,7\text{ кг/м}^3$  (на 14,0% больше).

Это позволяет несколько увеличить запас топлива в баках ЛА путем размещения в них двухфазного водорода (водородной шуги).

Плотность жидкого метана при нормальной температуре кипения  $422 \text{ кг/м}^3$ , при нормальной температуре кристаллизации  $444 \text{ кг/м}^3$  (на 5,2% больше), твердого при той же температуре  $452 \text{ кг/м}^3$  (больше на 10,2%).

Для перехода из жидкого в газообразное состояние при температуре кипения требуется подвод теплоты испарения водорода  $457 \text{ кДж/кг}$ , метана  $511 \text{ кДж/кг}$ . Соответственно, для ожижения при той же температуре требуется такой же по величине отвод теплоты конденсации. Как известно, водород самый легкий из всех газов, он в 14,5 раз легче воздуха. При атмосферном давлении и температуре  $293 \text{ К}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) его плотность  $0,0846 \text{ кг/м}^3$ , а максимальная (критическая) плотность  $30,7 \text{ кг/м}^3$  при давлении  $1,298 \text{ МПа}$  и температуре  $33,2 \text{ К}$ .

Газообразный метан при стандартных условиях имеет плотность  $0,717 \text{ кг/м}^3$ , а его максимальная (критическая) плотность  $163,5 \text{ кг/м}^3$  при давлении  $4,3 \text{ МПа}$  и температуре  $190,8 \text{ К}$ .

Водород отличается высокой теплоемкостью и теплопроводностью, высокой скоростью звука в газообразном состоянии ( $1305 \text{ м/с}$ ), большой скоростью и устойчивостью горения.

Как в жидком, так и в газообразном состоянии метан и водород бесцветны и не имеют запаха.

Справочные данные по криотопливам приведены в конце книги, в шестой таблице.

**4.1.3. Параводород и ортоводород.** Молекула водорода  $\text{H}_2$  имеет две модификации – *орто* и *пара*, различающиеся направлением спина ядер входящих в нее атомов (спина протонов, от англ. spin – вращаться, собственный момент количества движения которых может иметь 2 направления, определяющих направления спинового магнитного момента). В молекулах *ортоводорода* (*o*- $\text{H}_2$ ) спины протонов одинаковы (параллельны), в молекулах *параводорода* (*p*- $\text{H}_2$ ) – противоположны (антипараллельны). Из-за этого их физические свойства (удельная теплоемкость, температуры плавления и кипения) несколько различны, химические же свойства совершенно одинаковы.

В равновесном состоянии при  $293 \text{ К}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) газообразный водород представляет собой смесь 75% ортоводорода и 25% параводорода. Понижение температуры вызывает постепенное увеличение доли параводорода, которое сопровождается выделением тепла  $699 \text{ кДж/кг}$ . Переход в параформу завершается практически полностью при температуре  $20 \text{ К}$ , при нормальной температуре кипения равновесная доля параводорода составляет 99, 82%. Но в процессе ожижения водорода ортопараконверсия значительно запаздывает. Чтобы избежать испарения жидкого водорода, поскольку тепловой эффект реального ортопараперехода  $524 \text{ кДж/кг}$  превышает теплоту испарения, ортопараконверсию ускоряют при помощи катализаторов ( $\text{Ni}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Cr}$ , оксиды и гидроксиды  $\text{Fe}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Mn}$ ).

Обратный процесс – параортоконверсию водорода в ходе его газификации и нагрева в системе охлаждения теплонапряженных силовых установок, в особенности – гиперзвуковых, также целесообразно форсировать с целью повышения эффективности охлаждения.

**4.1.4. Энергетические показатели криотоплив.** Энергетические, точнее – эксергетические (в плане не только выделения энергии, но и ее преобразования в импульс тяги СУ) преимущества водорода и метана, как авиационных топлив, определяются четырьмя их характеристиками: теплотой сгорания, стехиометрическим коэффициентом, хладоемкостью и работоспособностью получаемых из них рабочих тел. Для водорода они на много выше по сравнению с авиакеросином, для метана также выше, но не столь резко. Удобно оценку этих преимуществ выражать через их влияние на удельный расход топлива  $C_{уд} = G_T/P$  кг/Н·час или кг/Н·с, где  $G_T$  – часовой или секундный расход топлива,  $P$  – тяга двигателя, или обратную ему величину удельного (единичного) импульса топлива  $J_{уд} = P/G_T$  сек, Н·с/кг топлива. Разумеется, величина  $C_{уд}$  или  $J_{уд}$  зависят от типа и режима работы двигателя, но отношение величин  $C_{уд}$  или, соответственно,  $J_{уд}$  для каких либо двух топлив определяется теплотой сгорания, стехиометрическим коэффициентом и другими свойствами топлив, использование которых зависит от технического совершенства двигателя (см. 4.3.1).

Удельная теплота сгорания  $H_u$  авиакеросина около 43 МДж/кг, газообразного водорода 120,0 МДж/кг – почти в 2,8 раза большая, газообразного метана 50,1 МДж/кг – на 17% выше, чем керосина. Дополнительный эффект при этом дает более высокая полнота сгорания водорода и метана.

Теплотворность жидкого водорода и жидкого метана нужно скорректировать на величину отвода теплоты при охлаждении от стандартной температуры 293 К (20°C), при конденсации, а для водорода также на тепловой эффект ортопараконверсии. Это приводит к значениям фактической теплотворности жидкого водорода 116,1 МДж/кг и жидкого метана 50,0 МДж/кг.

Распространенное представление о пропорциональном влиянии теплотворности на единичный импульс топлива  $J_{уд}$  или, соответственно, о том, что удельный расход топлива  $C_{уд}$  обратно пропорционален его теплотворности, нуждается в корректировке. Это связано с влиянием стехиометрического коэффициента топлива  $L_o$  – требуемой массы воздуха для полного сгорания единичной массы топлива. Его величина для водорода  $L_o = 34,38$  – в 2,3 раза больше чем для керосина, а для метана  $L_o = 17,21$  – на 16% больше по отношению к керосину. Влияние стехиометрического коэффициента также положительно, но влияние теплотворности и стехиометрического коэффициента взаимосвязано. Зависимость от них величин  $J_{уд}$  и  $C_{уд}$  оказывается более сложной, чем обычно рассматривается в учебной литературе применительно к авиационным керосинам, которые по значениям  $H_u$  и  $L_o$  мало отличаются друг от друга.

При равных значениях коэффициента избытка воздуха  $\alpha = G_v / G_T L_o$  для керосина, жидкого метана и жидкого водорода значения  $J_{уд}$  возрастают пропорционально  $\sqrt{L_o H_u}$  как 1 : 1,18 : 2,50 (без учета возможного влияния других факторов), что соответствует снижению удельного расхода топлива 1 : 0,846 : 0,4 (более подробно вопрос о величине  $J_{уд}$  и  $C_{уд}$ , обеспечиваемых криогенными топливами в воздушно-реактивных установках, см. 3.2.1.).

## 4.2. РЕСУРСЫ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА КРИОТОПЛИВ

**4.2.1. Проблема ресурсов энергоносителя для авиации.** Возникновение проблемы применения сжиженных горючих газов в качестве альтернативного авиационного топлива обязано нарастающему дефициту и удорожанию традиционного топлива, используемого реактивной авиацией – керосиновой фракцией нефти. Толчком к разработке планов широкой замены керосина криотопливами был нефтяной кризис 70-х гг., возникший на почве арабо-израильского конфликта. Эмбарго на поставку нефти из арабских стран в США и другие промышленно-развитые страны вызвало десятикратное повышение цен на нефть – примерно с 13 до 130 \$/т. Современная цена тонны нефти порядка 160\$.

Хотя разведанные запасы нефти достаточно велики – 160 млрд. т. (из них на долю России приходится примерно 10% – около 16 млрд. т), по большинству прогнозов их хватит только на 30-40 лет. Учитывая инерционность топливно-энергетического комплекса, это соответствует времени, необходимому для освоения альтернативных энергоносителей. В 2000 г. мировая добыча нефти составила 3,7 млрд. т., в России добыто 323 млн. т. На авиацию расходуется около 6% перерабатываемой нефти. Чтобы заменить традиционное топливо на природный газ, включая сжиженные газы и водород, требуются огромные производственные мощности.

Назревающий *глобальный* энергетический кризис сопровождается своеобразным *локальным* энергетическим кризисом на борту самих ЛА. Он обусловлен невысокими удельными параметрами авиакеросина, которые ограничивают возможность дальнейшего существенного повышения тактико-технических показателей ЛА, в частности, освоения "мертвого коридора" высот и скоростей между зонами полетов авиации и космической техники.

Применение метана (природного газа) и водорода могут обеспечить выход из кризисных ситуаций во всех аспектах, поскольку они имеют практически неисчерпаемые ресурсы и энергетически более эффективны, чем нефтяные топлива. Количество криогенного топлива обоих видов для авиации природными ресурсами не ограничивается, оно определяется экономически целесообразными масштабами их выработки.

**4.2.2. Ресурсы и добыча природного газа, производство СПГ.** Жидкий метан, практически – сжиженный природный газ (СПГ) следует рассматривать как *первичный* энергоноситель, несмотря на некоторую условность такого подхода, поскольку непосредственно в природе его нет, а ожижение природного газа по существу является технологическим процессом его переработки в несколько иной вид энергоносителя.

Потенциальные мировые запасы природного газа порядка 500 трл. м<sup>3</sup>, в пересчете на нефтяной эквивалент порядка 400 млрд. т, из них в России, главным образом на севере Сибири примерно 40%. Доказанные запасы газа в России превышают 54 трл.м<sup>3</sup>, в пересчете на нефтяной эквивалент более 44 млрд.т, что в 2,8 раза больше запасов нефти. В 2000 г. мировые поставки природного газа составили 1860 млн. т, из них более 450 млн. т добыто в России. Большие масштабы добычи природного газа в России обусловлены прежде всего нужда-



ми электроэнергетики и экспорта: природным газом обеспечивается 65-70% выработки электроэнергии тепловыми электростанциями России.

Коммерческое производство СПГ развернуто в Индонезии, Алжире, Малайзии, Брунее, Австралии, Абу-Даби, Ливии (более 100 млн. т/год). Из этих стран СПГ транспортируется танкерами-метановозами в Японию, США, страны Западной Европы, где его газифицируют для дальнейшего использования.

Прогнозируемая стоимость СПГ для России при крупных масштабах его производства и применения в 1,5-2 раза ниже стоимости авиакеросина и других нефтяных топлив, используемых транспортными средствами. Исходя из этого, в ближайшие 15-30 лет экономически целесообразно перейти на производство СПГ в качестве основного топлива не только для авиации, но и для других транспортных систем. Широко развитая сеть газоснабжения России обеспечит возможность получения СПГ и заправки им транспортной техники везде, где это целесообразно с точки зрения ее эксплуатации.

**4.2.3. Экологические преимущества СПГ.** Преимущество СПГ по отношению к керосину – менее вредные продукты сгорания. Известный негативный экологический фактор – выброс в атмосферу диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , создающего парниковый эффект, применением СПГ не устраняется, поскольку он является углеводородным топливом. Однако некоторое снижение выброса  $\text{CO}_2$  (на 13%) все же играет положительную роль. По экспериментальным данным, полученным при работе двигателя НК-88 на метане, выброс ядовитого монооксида углерода  $\text{CO}$  на порядок меньше, чем на керосине, оксидов азота – вдвое меньше. В продуктах сгорания СПГ нет канцерогенных веществ: практически отсутствуют полиароматические углеводороды, оксиды серы, дым, обычно образующиеся при горении керосина. Внедрение СПГ в транспорт, вместе с внедрением природного газа в отопительные системы и производство электроэнергии, в нагревательные устройства различного назначения может на порядок уменьшить загрязнение атмосферы.

Аварийные проливы СПГ не ведут к загрязнению почвы и водоносных горизонтов, как это происходит при попадании туда нефтепродуктов – СПГ быстро и полностью испаряется. По этой же причине техногенные аварии и катастрофы при использовании СПГ приносят меньше ущерба, чем при использовании керосина.

В открытом пространстве исключается возможность детонации смеси метана с воздухом, она взрывоопасна только в замкнутых объемах. Но внутри оборудования, работающего на СПГ, всегда поддерживается избыточное давление, что исключает проникновение воздуха.

**4.2.4. Природные источники водорода, производство жидкого водорода.** Почти весь природный водород Земли химически связан с кислородом (вода), углеродом (органические соединения) и другими элементами. В свободном состоянии водород  $\text{H}_2$  лишь в незначительном количестве содержится в месторождениях природного газа, в земной атмосфере (он попадает в нее при разложении органических остатков, из вулканических газов и из попутных газов при добыче нефти), а также иногда встречается в виде включений в горных породах. Поэтому водород  $\text{H}_2$  как энергоноситель получают из его соединений, он



является *вторичным* энергоносителем, для получения которого требуется затрата первичных энергоносителей (подобно получению электроэнергии). Основные способы производства газообразного водорода  $H_2$  – конверсия метана и других углеводородов ( $CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$ ;  $CH_4 + CO_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO$ ), электролиз *воды* ( $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$ ), разложение *воды* посредством различных термохимических процессов, а также выделение физическими методами из побочных водородсодержащих газов, образующихся при коксовании угля и в полимеризационных технологиях.

Следовательно, рассмотрение вопроса о ресурсах водорода не имеет смысла, его количество определяется возможностями его производства и хранения. Годовое производство газообразного водорода различного назначения во всем мире 50-55 млн. т, в России – около 5 млн. т. 80-90% его вырабатывается наиболее экономичным способом – паровой конверсией природного газа, которая однако, является экологически вредной и в общечеловеческом масштабе сводит на-нет положительный эффект применения водорода в качестве топлива.

Ожижение водорода производится на специальных установках, реализующих холодильные циклы с помощью компрессорного оборудования, турбодетандеров, теплообменников с использованием жидкого азота, процесса дросселирования водорода, аппаратов для проведения процесса ортопараконверсии. Своеобразие водорода в ходе ожижения состоит в том, что дросселирование при температуре выше 200 К (  $-70^0C$ ) вместо обычного для всех газов понижения температуры вызывает ее повышение. Поэтому для обеспечения охлаждающего дроссель-эффекта производится предварительное охлаждение водорода до 80К при помощи жидкого азота. Другая особенность – саморазогрев и испарение сжиженного газа из-за длительной (несколько суток) самопроизвольной ортопараконверсии. Чтобы предотвратить испарение водорода, процесс перехода ортоводорода в параводород проводится в ходе самого ожижения с помощью катализатора (см. 4.1.3). Сложность и дороговизна процесса ожижения водорода примерно удваивает его стоимость.

В настоящее время международный рынок товарного жидкого водорода только начинает складываться. И хотя средняя цена жидкого водорода в расчете на единицу получаемой энергии пока еще в несколько раз превышает цену нефтяного топлива, ресурсные, экологические и другие преимущества водорода уже обеспечили вложение сотен миллионов долларов и евро в НИОКР и создание технологий, позволяющих в перспективе широко использовать водород в качестве топлива. Любопытно, что в этом инвестировании участвуют крупнейшие нефтяные компании, заботящиеся о своем будущем, рассматривая водород как "вторую нефть".

До середины 90-х годов передовые позиции в создании водородной энергетики и техники, работающей на водородном топливе, занимала наша страна. Были созданы и успешно прошли испытания с реальным применением водородного топлива первые в мире экспериментальный криогенный самолет, экспериментальный автомобиль с топливными элементами, подводные лодки с электрохимическими генераторами. Выполнено много других крупных разработок общенаучного и народнохозяйственного значения. Сданы в эксплуата-

цию заводы, обеспечивавшие получение 4500 т жидкого водорода в год, но почти все они при распаде СССР оказались за пределами России и прекратили производство.

**4.2.5. Экологические преимущества жидкого водорода.** Водород и единственный продукт его сгорания – чистый водяной пар безвредны. Возможно только незначительное (меньшее, чем при грозах) образование оксидов азота при горении, поэтому вопрос об их опасности требует изучения. Недостаточно ясна возможная их роль как катализатора разрушения слоя озона  $O_3$ , защищающего все живое от поражения ультрафиолетовым излучением Солнца в случае полетов водородных гиперзвуковых самолетов на высоте порядка 80 км.

Цены на топливо не отражают затрат на компенсацию ущерба окружающей среде: здоровью населения, объектам инфраструктуры производства и применения топлив, зданиям и растительности. Водород наносит ущерб в 15-20 раз меньший, чем нефтепродукты, стоимость ущерба от использования которых близка к цене самого топлива. Поэтому логично оценивать водород по его "социальной" стоимости с вычетом затрат на ущерб, вызываемый нефтепродуктами, которые он заменит.

Разумеется, должен также учитываться экологический ущерб от производства самого водорода – его не будет только в случае таких первичных источников энергии для его получения, как геотермическая энергия земных недр, гидроэнергия рек. Так, для Исландии, богатой такими источниками энергии, но использующей дорогую привозную нефть, разработан и начал осуществляться водородный проект, который предусматривает перевод всего транспорта и рыболовных судов на водородное довольствие. Главным направлением при этом является применение вместо двигателей внутреннего сгорания электродвигателей с питанием от твердоокисных и твердополимерных топливных элементов.

### **4.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

**4.3.1. Принципиальные возможности и способы увеличения удельного импульса.** В воздушно-реактивных двигателях жидкий водород и жидкий метан (практически СПГ) имеют лучшие тягово-экономические показатели, чем традиционное нефтяное топливо – авиакеросин. Они обеспечивают более высокий удельный импульс, то-есть возможность увеличения тяги и уменьшения расхода топлива, но не только за счет более высокой теплотворности. Специфика криотоплив – высокие значения теплоемкостей, газовых постоянных, хладоресурса и др. – обеспечивают им эксергетические преимущества – более полное превращение тепловой энергии в механическую.

Это может осуществляться путем введения дополнительных устройств в схему криогенного двигателя. Рис. 4.2 иллюстрирует возможные способы увеличения удельного импульса тяги (но отнюдь не реальную схему какого-то криогенного двигателя). Так, турбодетандер (ТД) при полете на сверх- и особенно гиперзвуковых скоростях и теплообменник (ТОК) для охлаждения воздуха перед компрессорами низкого давления (КНД) и высокого давления (КВД) вплоть до ожижения воздуха (при изменении схемы двигателя) уменьшат затраты работы на привод компрессоров и увеличат возможность подвода тепла в

камеру сгорания (КС). Автономная турбина (АТ), работающая на газифицированном криотопливе до его сжигания, уменьшит перепад давления на газовых турбинах (ТВД и ТНД) и обеспечит более высокое давление перед реактивным соплом. Высокое давление на входе автономной турбины создает жидкостный топливный насос (ТН), требующий небольшой затраты работы, а высокая температура достигается нагревом в теплообменнике турбин (ТОТ), находящимся за камерой сгорания. С помощью теплообменника-регенератора часть низкопотенциальной теплоты возвращается через топливный контур в зону высокого давления камеры сгорания. Это подобно увеличению теплотворности повышает к.п.д. цикла и, соответственно, удельный импульс.

Но прежде всего благодаря хладоресурсу криотоплив для увеличения удельного импульса может быть повышена температура газа в камере сгорания  $T_r$  вплоть до стехиометрической, что обеспечивается интенсивным охлаждением лопаток турбины и других устройств, лимитирующих повышение  $T_r$ . Повышается термический к.п.д.  $\eta_t = 1 - T_{oc}/T_r$  (см. 3.2.2). Отпадает вопрос об использовании в криогенных ГТД неэкономичной форсажной камеры.

Кроме того, увеличению удельного импульса способствует более низкая, чем для керосина, молекулярная масса продуктов сгорания, которой соответствует более высокая их газовая постоянная и теплоемкость, меньшие потери энергии с выхлопными газами из-за диссоциации продуктов сгорания. Более высокий стехиометрический коэффициент позволяет достичь стехиометрического режима при меньшем расходе топлива [12].

**4.3.2. Оценка целесообразности использования двухтопливных систем.** Максимальные полетные возможности ЛА, обеспечиваемые топливом, выражаются формулой (3.3). Ограничение этих возможностей при применении криотоплива малой плотности  $\hat{\rho}$  связано с предельным объемом его заправки. Может быть целесообразным сочетание криотоплива с традиционным топливом большей плотности  $\rho$ , удельный импульс которого меньше.

С увеличением объемной доли криотоплива  $K_v$  повышается приведенный удельный импульс. Приблизительно его можно оценить выражением:

$$\bar{J}_{уд} = K_v \hat{\rho} / \hat{C}_{уд} + (1 - K_v) \rho / C_{уд},$$

где  $\hat{C}_{уд}$  и  $C_{уд}$  - соответственно удельные расходы криогенного и традиционного топлив.

При одной и той же массовой доле топлива, неизменной стартовой массе и одинаковой полезной нагрузке ЛА интегральный импульс возрастает пропорционально приведенному удельному импульсу  $I_T = \bar{J}_{уд} \ln 1/(1 - \xi_T)$ , где второй множитель – величина массоотдачи  $\ln(1/(1 - \xi_T)) = \text{const}$ ,  $\xi_T$  – массовая доля топлива.

Приведенная плотность топлива приближенно оценивается как плотность смеси двух топлив  $\bar{\rho} = \hat{\rho} + (1 - K_v) \rho$ , ее уменьшение при полной заправке ( $V_{\text{макс}} = \text{const}$ ) влияет на интегральный импульс резче, чем увеличение удельного импульса.

Максимум интегрального импульса определяется как точка пересечения его зависимостей от приведенного удельного импульса при  $\xi_T = \text{const}$  и от приведенной плотности при  $V_{\text{макс}} = \text{const}$  (рис. 4.4). При максимуме интегрального

импульса обеспечиваются наибольшие полетные возможности ЛА, конкретное использование которых может быть самым разным.

Такой подход дает вполне понятное обоснование целесообразности двухтопливных систем ЛА. Если пересечения нет и величина интегрального импульса оказывается более высокой для криогенного или традиционного топлива при любых их соотношениях, то с позиции летно-технических показателей двухтопливная система не выгодна [13].

#### **4.4. ИНФРАСТРУКТУРА КРИОГЕННОГО ТОПЛИВООБЕСПЕЧЕНИЯ**

**4.4.1. Роль инфраструктуры.** Для функционирования криогенной авиации разработана промышленная наземная (аэродромная) инфраструктура между добычей первичных энергоресурсов и летательным аппаратом, включающая производство криотоплив, средства их хранения и транспортирования, заправку ЛА криотопливом. Ключевой ее частью является создание инфраструктуры обеспечения сжиженным природным газом.

Масштабы и сроки развертывания инфраструктуры будут определяться масштабами и сроками внедрения криогенных топлив в авиацию и соответствующим финансированием. Работы в области инфраструктуры опираются на отечественный научно-технический задел и учитывают мировую практику, обеспечившую на рубеже веков производство и потребление многих миллионов тонн криогенных топлив.

В России географически удачным является взаимное расположение магистральных газопроводов и основных аэропортов. Поэтому целесообразно организовать производство СПГ вблизи крупных аэропортов. Это позволит обойтись без загрузки железных и шоссейных дорог перевозкой СПГ, без создания крупного автомобильного и железнодорожного парка, специально предназначенного для перевозки СПГ, избежать существенных потерь при переливах.

Хранение СПГ предполагается в теплоизолированных резервуарах, связанных с системой централизованной заправки самолетов. Объем аэродромных хранилищ рассчитывается на трехсуточный запас. Такая единая комплексная система производства, хранения и заправки самолетов наряду с основным назначением позволит использовать излишки СПГ для народнохозяйственных нужд и улучшить экологическую обстановку.

Для обеспечения криотопливом (СПГ, а в будущем и жидким водородом), отдаленных аэродромов и также эпизодической доставки криотоплива при нерегулярном использовании аэродромов криогенными самолетами разработаны и в ограниченном количестве созданы автоцистерны, железнодорожные цистерны, криогенные контейнеры, а также предусматривается создание для этих целей специального грузового самолета. Большие успехи в области криогенной инфраструктуры достигнуты при обеспечении программы "Энергия-Буран". Для обеспечения заправки в баки второй ступени ракеты-носителя "Энергия" 103т жидкого водорода на космодроме Байконур построено хранилище на 250-270 т. Разработаны криогенные трубопроводы диаметром до 400 мм, криогенная дистанционно управляемая арматура, технология заправки без использования дорогого и дефицитного у нас гелия.



**4.4.2. Установки по производству СПГ.** В настоящее время в России действуют 6 установок ожижения природного газа производительностью от 200 до 1000 кг/ч СПГ. Спроектирована, но недостроена установка на Московском газоперерабатывающем заводе, рассчитанная на 3 т/ч. При реальном увеличении финансируемой потребности авиации СПГ может быть изготовлено по разработанному проекту необходимое количество установок производительностью 10-12 т/ч СПГ с размещением вблизи аэродромов и снабжением газом от газовых магистралей. Протяженность магистральных газопроводов в России более 150 тыс. км, их диаметр до 1420 мм. Компрессорные станции, обеспечивающие перекачку газа по ним с давлением до 7,4 МПа, имеют суммарную мощность около 42 млн. кВт.

В различных районах России на региональном уровне создаются малые ожижительные установки для получения СПГ различного назначения, в том числе с помощью турбодетандеров, использующих перепад давления на газораспределительных станциях понижения давления (от 5-7 МПа до 0,2-0,4 МПа).

**4.4.3. Средства транспортирования СПГ.** Автомобильные цистерны для перевозки СПГ имеют вместимость 16,24 и 30 м<sup>3</sup>, за рубежом до 45 м<sup>3</sup> (ФРГ) и до 66 м<sup>3</sup> (США). Они снабжаются тепловой изоляцией, практически предотвращающей потери газа (составляют десятые доли процента в сутки). Цистерны невысокой емкости снабжены наиболее эффективной экранно-вакуумной или порошково-вакуумной изоляцией, а самые крупные обычно имеют пенополиуретановую изоляцию толщиной 150-200 мм со стальной или алюминиевой обшивкой. Автоцистерны выполнены в виде автомобильных полуприцепов (например, на полуприцепе тягача КАМАЗ), они могут эксплуатироваться на дорогах как с бетонным, так и с асфальтовым покрытием. В цистерне поддерживается рабочее давление 0,6-1,0 МПа.

Более выгодной считается перевозка СПГ в железнодорожных цистернах. Вместимость отечественной цистерны 30 м<sup>3</sup>, рабочее давление 0,7 МПа. Внутренний сосуд выполнен из алюминиевого сплава, наружный – стальной, между ними находится порошково-вакуумная изоляция. Суточные потери 0,27%.

Исходя из географических особенностей России представляет интерес перевозка СПГ речным транспортом, в том числе контейнерные. Транспортные криогенные резервуары-контейнеры на 25 м<sup>3</sup> СПГ помещены в каркасные устройства с крепежными приспособлениями для перевозки автомобильным, железнодорожным, водным и воздушным транспортом (рис. 4.7).

**4.4.4. Средства хранения СПГ.** В качестве хранилищ СПГ используются резервуары двух типов – криогенные и изотермические. Криогенные были разработаны для ракетно-космических систем в качестве хранилищ жидких кислорода, водорода, азота. В них поддерживается давление 0,5-0,6 МПа. Конструкция выполнена цилиндрической двухстенной ("резервуар в резервуаре") с экранно-вакуумной или порошково-вакуумной тепловой изоляцией. При хранении СПГ уровень суточных потерь 0,15% может быть обеспечен и более дешевой пенополиуретановой изоляцией. Такой вертикальный резервуар емкостью 25 м<sup>3</sup>, высотой 7 м и диаметром 3 м находится в стадии разработки.

Лучшими по экономичности являются изотермические резервуары, в которых СПГ хранится при давлении несколько выше атмосферного и имеет темпе-



ратуру, близкую к температуре кипения. В отечественной практике крупные изотермические резервуары имеются на предприятиях по производству жидкого аммиака, жидкого этилена и др. За рубежом изотермические резервуары для хранения СПГ построены на базе резервуаров для хранения нефтепродуктов. Дешевая порошковая изоляция с поддувом азотом (для предотвращения выпадения влаги) позволяет создать изотермические хранилища емкостью до сотен тысяч кубических метров. Двустенные цилиндрические резервуары имеют внутреннюю оболочку из хладостойкой (9%-ной никелевой) стали или железобетона, а наружная оболочка делается из углеродистой стали или бетона. В резервуаре емкостью 5 млн. м<sup>3</sup> пространство между стенками шириной 1,5 м заполнено перлитом. Вокруг резервуара сооружена невысокая защитная дамба – земляная или железобетонная, предотвращающая разлив СПГ по большой площади в случае аварии.

Выдача СПГ производится с помощью погружных крионасосов производительностью порядка 50т/час.

#### **4.5. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КРИОГЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

**4.5.1. Криогенные самолеты.** Первые в мире полеты экспериментального криогенного самолета Ту-155 с двигателем НК-88 (первый полет на жидком водороде 15 апреля 1988г., первый полет на СПГ 18 января 1989 г., суммарный налет 120 часов) показали реальную возможность решения технических проблем криогенного авиастроения. В перспективных планах фирмы "Туполев" предусмотрено применение СПГ на ряде самолетов новых типов [1].

Ряд ведущих фирм США, Японии и Западной Европы – Боинг, Локхид, Дойче Аэроспейс, Эрбас Индастри и др. – прогнозируют применение СПГ и жидкого водорода в качестве основных авиационных топлив. Предполагается, что начиная с 2010-2020 гг. развернется широкое внедрение криогеники в мировую практику авиации. Наличие криотоплив на борту ЛА позволит широко применять криоэлектронику и создавать новые виды оружия.

Главная особенность конструктивной схемы перспективных криогенных самолетов – размещение большого объема топлива малой плотности с крайне низкой температурой в фюзеляже что в сочетании с экрано-вакуумной тепловой изоляцией позволит избежать нагрева топлива в полете (рис. 4.5). В крыльевых баках криогенного топлива не должно быть, но может быть использована и большей частью выгодна двухтопливная система с размещением в них керосина в крыльевых баках.

При использовании водорода неизбежно снижение аэродинамического качества на 10-15% в сравнении с аналогичными самолетами на традиционном топливе, но несмотря на это должны существенно улучшиться весовые, летно-технические и экономические характеристики как дозвуковых так и сверхзвуковых самолетов. При неизменной коммерческой нагрузке и дальности полета максимальный взлетный вес уменьшится, соответственно, примерно на 25 и 50%, запас топлива на 70 и 75%. Требуемая тяга двигателей меньшей на 10 и 40%, потребная длина ВПП примерно на 20%.

Двухтопливный вариант обеспечит увеличение дальности полета по отношению к однотопливному на 10-20%, отказ от форсажной камеры ТРД или использование водорода только в форсажной камере облегчит эксплуатацию в условиях ограниченной сети "криогенных" аэродромов.

Применение жидкого метана дает, как правило, незначительное улучшение летно-технических показателей. Объем метановых баков почти вдвое больше керосиновых. Рациональным является их размещение в верхней части фюзеляжа, на пассажирских самолетах – над салоном.

Первоочередными проектами является создание двухтопливных самолетов среднемагистрального Ту-206 с размещением баков СПГ на фюзеляже и крыльевыми керосиновыми баками (рис. 4.6) (дальность полета до 5200 км, 210 пассажиров) и регионального Ту-136, разработанного по оптимальной компоновке (2000 км, 53 пассажира или 5 т коммерческого груза).

Возможна также первоочередная реализация военно-транспортного самолета Ту-330СПГ с двигателями ПС-92 рассчитанного на перевозку 30 т груза на расстояние 2500 км. Другой вариант – самолет-танкер Ту-330Т – СПГ с размещением 30т СПГ внутри фюзеляжа сможет обеспечить регулярную доставку СПГ из газодобывающих районов в районы его потребления при стоимости транспортирования того же порядка, что и по магистральному газопроводу. Важное его преимущество – обеспечение газоснабжения в экстремальных ситуациях (стихийных бедствиях, авариях газопроводной системы, нарушениях газоснабжения вследствие военных действий).

Применение криогенных топлив на самолетах фронтовой авиации без подвесных баков уменьшит максимальную дальность полета, но не нанесет ущерба выполнению большинства задач учебно-боевой подготовки, обеспечив ее значительное удешевление. Самолеты будут существенно более легкими, что повысит их боевую эффективность. При использовании криогенных подвесных баков дальность полета может даже увеличиться. На тех самолетах, где имеются резервные ("перегоночные") емкости, именно они могут быть переоборудованы под СПГ. Жидкий водород можно использовать только в форсажной камере двигателей истребителей для повышения скороподъемности, разгона и потолка.

Применение криогенных топлив может повысить скрытность боевых самолетов путем использования хладоресурса в системе "стелс" (англ. steals – украдкой, втихомолку) для снижения теплового излучения, а также исключения демаскирующего самолет дымления двигателей.

**4.5.2. Гиперзвуковые и воздушно-космические ЛА.** Для этих ЛА, а также авиационно-космических систем криогенные топлива (главным образом жидкий водород) совершенно необходимы как с позиций повышения эксергетической эффективности, так и, прежде всего, ввиду их термической стабильности. Керосин не выдерживает аэродинамического нагрева до температур 600-800<sup>0</sup>С, неизбежного в гиперзвуковом полете со скоростью  $M = 4-6$ , и еще более высоких температур при  $M = 6-8$  и выше. Разработка реальных ГЛА, ВКС и АКС ведется в России, США, Англии, Германии, Франции, Японии в течение последнего десятилетия XXв., но начала реализации проектов можно ожидать примерно к 2010 году. Технические предложения подготовлены ведущими

авиационными КБ. Они имеют как военное назначение, так и гражданское: обеспечат резкое сокращение продолжительности транспортных операций, быструю доставку специалистов и технических средств при чрезвычайных ситуациях, экономию времени высшего административного персонала.

Наиболее проработанными являются двухступенчатые авиационно-космические системы, которые могут снизить в 5-10 раз стоимость выведения грузов на космические орбиты по сравнению с современными одноразовыми ракетно-космическими системами. Преимуществом АКС является использование аэродромов вместо уникальных космодромов и экологическая чистота запусков. В России готов к реализации проект МАКС (рис. 4.7) по которому самолет-носитель Ан-225 "Мрия" на высоте 8 км обеспечивает старт космического самолета с ЖРД. Для его выведения на орбиту требуется 21 т жидкого водорода, 196 т жидкого кислорода и 20 т керосина [19].

Предварительно проработанный проект ВКС Ту-2000 (рис. 4.8) с взлетной массой 260-300 т предполагает использование ТРД, ПВРД и ЖРД составляющего 55-60% этой массы жидкого водорода, с размещением его в баке диаметром 8 м. Он рассчитан на уровень технологий 2015-2020 г.г.

В более дальней перспективе предполагается создание системы МиГАКС, состоящей из гиперзвукового самолета-разгонщика и многоразового орбитального самолета с использованием жидкого водорода на обоих.

При разработке ГЛА и ВКС решающим является создание силовой установки, как правило, комбинированной – (ТРД+ПВРД+ЖРД) турбопрямоточный или же основанной на использовании особого свойства жидкого водорода – высокой работоспособности рабочего тела, получаемого при его газификации и подогреве. Ракетно-турбинные параводородные двигатели (рис. 4.9) в принципе могут обеспечить все этапы полета ГЛА. Изучается вопрос об использовании жидкого метана в качестве источника рабочего тела автономной турбины (рис. 4.10).

Работы по созданию гиперзвуковых ПВРД вышли на уровень летных испытаний. С 1991 г. ЦИАМ совместно с другими предприятиями России при поддержке французских партнеров проводит испытания водородного ГПВРД при числах  $M = 5-6,5$ , являясь мировым лидером в этой области.

Разработана и находится на стадии реализации летающая лаборатория – исследовательский гиперзвуковой летательный аппарат "Игла", рассчитанный на испытание водородных ГПВРД при  $M = 6-14$ .

**4.5.3. Ракеты-носители космических объектов.** Применение жидкого водорода в качестве горючего ЖРД ракет-носителей вместо используемых на серийных изделиях высококипящих горючих обеспечит существенное улучшение их тактико-технических показателей.

Прорабатывается проект многоразовой всеазимутальной ракеты-носителя (МВРН) с крылатой первой ступенью (рис. 4.11). Ее стартовая масса около 950 т. ЖРД первой ступени работает на жидком метане, ЖРД второй ступени на жидком водороде с окислителем жидким кислородом в обеих ступнях. Она должна обеспечить выведение широкой номенклатуры полезных нагрузок до 40 т на низкую опорную орбиту, что обеспечит России качественно новый уровень средств выведения [26].

### РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

#### 5.1. ГЛАВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

**5.1.1. Чем отличаются ракетные топлива от других топлив.** *Ракетным топливом является совокупность веществ, расходуемых (как правило, сжигаемых) в ракетном двигателе с целью получения и нагрева газообразного рабочего тела, при истечении которого создается сила тяги.* В состав ракетного топлива обычно входит как горючее, так и окислитель или же вещества, которые выделяют энергию и газифицируются при разложении. Ракетные топлива отличаются высокой химической активностью, обеспечивающей весьма интенсивное протекание рабочего процесса.

Отбрасываемая ракетным двигателем газовая струя образуется только из топлива без участия воздуха, поэтому единица массы продуктов сгорания получает всю энергию, выделяемую единицей массы ракетного топлива. Она в несколько раз больше, чем при горении топлива в воздухе, содержащем 77% балластного азота, но в несколько раз меньше теплотворности горючего, так как преобладающую часть ракетного топлива составляет окислитель. Это обуславливает неэкономичность ракетных двигателей – высокий удельный расход ракетного топлива, и порождает стремление использовать в его составе вещества с максимально возможной теплопроизводительностью. Однако при высокой температуре горения (выше 3000 К) из-за термической диссоциации понижается термический к.п.д. Более выгодны топлива с большим газообразованием, температура продуктов сгорания которых ниже.

Ракетное топливо является главным фактором, определяющим рабочий процесс, удельный импульс и конструкцию ракетных двигателей.

**5.1.2. Виды ракетных топлив.** *Компонентами ракетного топлива принято считать его составные части, отдельно поступающие в камеру сгорания двигателя. Не только одно вещество, но и заранее приготовленная смесь совместно поступающих веществ рассматривается как единый компонент. Практически применяются одно-и двухкомпонентные жидкие топлива и однокомпонентные твердые, перспективными считаются двух- и трехкомпонентные гибридные топлива, в состав которых входят жидкие и твердые компоненты. Ракетные двигатели именуются соответственно топливу жидкостными (ЖРД), ракетными двигателями твердого топлива (РДТТ) и гибридными (ГРД).*

Жидкие компоненты подаются в камеру сгорания ЖРД насосным агрегатом или баллонной системой. В качестве окислительных компонентов используются азотная кислота, азотный тетроксид и их смеси, жидкий кислород, пероксид водорода. В качестве горючих компонентов используются углеводороды (типа керосина и жидкий метан), гидриды и алкилгидриды азота, жидкий водород.

РДТТ не имеют системы подачи топлива, профилированный заряд твердого ракетного топлива в виде пластической или каучукообразной массы помещается непосредственно в камеру сгорания. Поэтому твердое ракетное топливо считается однокомпонентным, хотя оно представляет собой смесь окислителя



(обычно соли хлорной или азотной кислоты) и горючего (органического полимера и металла) или даже состоит из веществ, имеющих в исходном виде различное агрегатное состояние (твердое коллоидное топливо, получаемое путем загущения жидкого нитроглицерина волокнистой нитроцеллюлозой).

В ГРД, схема которого условно называется *прямой*, твердый компонент (например, полимерное горючее) находится в камере сгорания, а жидкий (например, пероксид водорода) поступает туда из внешнего бака. В камере сгорания ГРД другой схемы, условно называемой *обратной*, находится окислитель смесового твердого топлива с добавкой связующего полимера, а из внешнего бака подается жидкое горючее, большей частью углеводородное.

## 5.2. ТЯГОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ.

**5.2.1. Удельный импульс.** Идеальный удельный импульс ракетного двигателя (сила тяги, деленная на секундный расход топлива) при расчетном режиме истечения без трения и потерь тепла численно равен идеальной скорости истечения:

$$J_{уд}, \text{ Нс/кг} = c_{ид} = \sqrt{2c_p^v T_r V_r \eta_t}, \text{ м/с} \quad (5.1)$$

где  $c_p^v$  – теплоемкость 1 нм<sup>3</sup> газа при постоянном давлении;  $T_r$  – идеальная температура горения;  $\eta_t = 1 - 1/\pi_c^{(k-1)/k}$  – термический к.п.д.;  $\pi_c$  – перепад давления газа в сопле ракетного двигателя;  $k$  – показатель адиабаты процесса расширения газа в сопле;  $V_r = 22,4/\mu$  газообразование ракетного топлива в нм<sup>3</sup>/кг;  $\mu$  – молекулярная масса продуктов сгорания.

Все факторы, входящие в формулу (5.1), связаны с составом топлива и образующихся из него продуктов сгорания.

Прирост температуры газа при сгорании без учета диссоциации, согласно формуле (2.8), зависит главным образом от газообразования и теплопроизводительности топлив  $\Delta T_r = T_r - T_o = h_u / (c_p^v \cdot V_r)$

Влияние на удельный импульс газообразования и температуры практически компенсировало бы друг друга при равной теплопроизводительности топлива, если бы высокая температура не была сопряжена с диссоциацией продуктов сгорания. В результате диссоциации газ перед входом в сопло обладает запасом химической энергии, не перешедшей в тепловую. Он тем больше, чем выше температура  $T_r$ . По мере расширения и понижения температуры газа в сопле диссоциированные осколки молекул соединяются, химическая энергия до конца переходит в тепловую. В результате этого из сопла выходит более горячий газ, чем при отсутствии диссоциации. Соответственно меньшим получается термический к.п.д.  $\eta_t = 1 - q_1/q_2$  (подводимое тепло рабочего цикла  $q_1$ , отводимое –  $q_2$ ) и ниже удельный импульс. Уменьшение к.п.д. условно выражается снижением показателя процесса расширения до  $k = 1,2-1,1$ .

Следовательно, выгодны топлива с большим газообразованием, низкомолекулярные продукты сгорания которых, обладающие высокой теплоемкостью, имеют не слишком высокую температуру и благодаря этому в меньшей степени диссоциированы. Водород, продукты сгорания которого имеют низкую молекулярную массу ( $\text{H}_2\text{O} - 18$ ), в этом отношении лучше углерода ( $\text{CO}_2 - 44$ ) и



других горючих элементов. Преимущество имеют продукты сгорания с двухатомными молекулами ( $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ), более стойкими против диссоциации, чем трех- и многоатомные ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ).

Увеличение газообразования обеспечивается недостатком окислителя (при уменьшении  $\alpha$  до 0,7-0,8, а в случае кислородно-водородного топлива даже до  $\alpha = 0,4$ ) за счет низкой молекулярной массы несгоревшего водорода  $\text{H}_2$  ( $\mu = 2$ ) и монооксида углерода  $\text{CO}$  ( $\mu = 28$ ), образующегося вместо диоксида  $\text{CO}_2$ . Выигрыш в степени использования энергии (термическом к.п.д.) при этом перекрывает снижение теплового эффекта горения и обеспечивает получение максимального удельного импульса (см. рис. 5.4, 5.7).

Таким образом, энергетическая эффективность ракетного топлива оценивается удельным импульсом, которую он обеспечивает, а не теплопроизводительностью горючего или температурой продуктов горения. Следует иметь в виду, что величина  $J_{\text{уд}}$  – показатель относительный, потому что он зависит не только от топлива. В табл. 2 приведены расчетные данные по удельному импульсу для жидких ракетных топлив при указанных в ней условиях по  $\alpha$ , давлению в камере сгорания  $p_k$ , давлению на срезе сопла  $p_c$  и расширении сопла  $F_c/F_{kr}$  для космоса.

**5.2.2. Перспективные трехкомпонентные композиции с максимальным удельным импульсом.** Трехкомпонентное топливо состоит из жидкого окислителя, металлсодержащего горючего и отдельного газообразующего компонента, предназначенного для получения рабочего тела с выгодными термодинамическими свойствами. Лучшим газообразующим компонентом является жидкий водород, который в этом случае не вовлекается в процесс горения, а подогревается теплом, выделенным при сжигании металла. Наивысшие значения теоретического удельного импульса соответствуют комбинациям, сочетающим максимальную теплопроизводительность бериллия с кислородом и лития со фтором (23,8 МДж/кг) и максимальное газообразование, которое обеспечивается водородом (данные в Н·с/кг приводятся для истечения в вакуум):

Бериллий – кислород	3280	Литий – фтор	4560
<i>Бериллий – кислород – водород</i>	<i>5640</i>	<i>Литий – фтор – водород</i>	<i>5200</i>

Соотношение компонентов должно быть таким, чтобы металлы сгорали полностью, а водород оставался в основном свободным. Предполагается, что бериллий может поступать в камеру сгорания двигателя в виде порошка или помещаться в виде сот, а литий в расплавленном состоянии (он плавится при  $180^\circ\text{C}$ ).

**5.2.3. Плотность ракетных топлив.** Наряду с удельным импульсом существенное влияние на скорость, высоту и дальность полета ракетного летательного аппарата оказывает плотность ракетного топлива (рис. 5.1). Если весь импульс тяги затрачивается только на разгон летательного аппарата, то максимальная скорость выражается формулой Циолковского:

$$v_{\text{макс}} = J_{\text{уд}} \ln(m_0/m_k) = J_{\text{уд}} \ln[1 - (V_T \rho_T / m_0)]^{-1} \quad (5.2)$$

При начальной полетной массе  $m_0$ , установленной в соответствии с тягой двигателя, плотность топлива  $\rho_T$  резко влияет на разгон летательных аппаратов с большей топливной емкостью  $V_T$ , приходящейся на единицу начальной по-

летной массы, из-за более резкой зависимости конечной массы  $m_k$  от плотности топлива:  $m_k = m_n - V_T \rho_T$ . Однако этот эффект от увеличения плотности дается ценой уменьшения полезной нагрузки –  $\Delta m_n = \Delta \rho_T V_T$ .

В случае определения прироста скорости ступени ракеты вместо величины  $v$  в формуле (5.2) записывается  $\Delta v$ .

Однако, как правило, представляет интерес оценка роли плотности топлива, как фактора, определяющего его *несущую способность* – выведение к моменту *выработки топлива* в заданную точку пространства или на заданную космическую орбиту возможно большего полезного груза. Основой такой оценки служит та же формула (5.2).

Если считать массу конструкции ракеты (или ступени ракеты)  $m_k$  величиной, пропорциональной объему топливных баков (равному объему топлива  $V_T = m_T / \rho_T$ ) то  $m_k = A m_k / \rho_T$ , а стартовая масса (или масса ступени в момент ее отделения) без полезной нагрузки  $m_0 = m_k + m_T = m_T (1 + A / \rho_T)$ , где коэффициент пропорциональности для ЖРД и РДТТ соответственно –  $A^{\text{ж}} \approx 64 \text{ кг/м}^3$  и  $A^{\text{т}} \approx 240 \text{ кг/м}^3$ . При этом доля массы конструкции  $g_k^{\text{ж}} \approx 0,05-0,06$  и  $g^{\text{т}} \approx 0,12-0,13$ . Плотность топлива принята соответственно  $\rho_T^{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_T^{\text{тв}} \approx 1750 \text{ кг/м}^3$ .

Подстановка этих выражений в формулу (5.2) дает зависимость  $v$  или  $\Delta v$  от полезной нагрузки  $m_n$ :

$$\Delta v = J_{\text{уд}} \ln \{ 1 + [A / \rho_T + m_n / m_0 (1 + A / \rho_T)]^{-1} \} \quad (5.2')$$

Отсюда следует выражение для полезной нагрузки отнесенной к единице начальной массы:

$$\xi_n^m = m_n / m_0 = (1 + A / \rho_T)^{-1} [(e^{\Delta v / J_{\text{уд}}} - 1) - A / \rho_T] \quad (5.3)$$

Если подставить в (5.2')  $m_T = \rho_T V_T$  и  $m_k = A V_T$ , то получается выражение для полезной нагрузки, отнесенной к единице объема топливных баков:

$$\begin{aligned} \Delta v &= J_{\text{уд}} \ln [1 + \rho_T (A + m_T / V_T)], \\ \xi_n^v &= m_n / V_T = \rho_T (e^{\Delta v / J_{\text{уд}}} - 1)^{-1} - A \end{aligned} \quad (5.4)$$

Относительная нагрузка  $\xi_n$  полностью определяется характеристиками топлива – его плотностью и удельным импульсом (рис. 5.1), причем величина  $\xi_n^v$  практически пропорциональна плотности топлива,  $\alpha \rho$  [22].

Разумеется, само понятие плотности в случае двухкомпонентного ракетного топлива является условным, так как окислитель и горючее хранятся и подаются в камеру сгорания отдельно. При соотношении компонентов *расчетная плотность топлива* определяется как отношение суммы масс горючего и окислителя  $1 + \kappa$  к сумме их объемов  $V_{\text{г}} + V_{\text{ок}} = 1 / \rho_{\text{г}} + \kappa / \rho_{\text{ок}}$

$$\rho = (1 + \kappa) / (1 / \rho_{\text{г}} + \kappa / \rho_{\text{ок}}) \quad (5.5)$$

Так как ракетные топлива разного состава могут в несколько раз различаться по плотности, роль ее в обеспечении летно-технических характеристик ракетного летательного аппарата весьма значительна. Может быть выгодным по несущей способности и максимальной скорости более тяжелое топливо, даже если его удельный импульс меньше.

**5.2.4. Общие требования к ракетному топливу.** К ракетным топливам всех видов (жидким, и твердым, одно- и двухкомпонентным, высококипящим и криогенным и т. д.) предъявляются некоторые общие требования, но конкретные составы могут не соответствовать тем или иным из них. К числу желательных качеств любого ракетного топлива относятся:

- высокий удельный импульс достигаемый в результате оптимального сочетания высокой теплопроизводительности топлива, низкой молекулярной массы и минимального числа атомов в молекулах продуктов сгорания;

- высокая плотность;

- не слишком высокая температура горения (во избежание значительной термической диссоциации продуктов сгорания и в целях обеспечения надежности двигателя);

- нормальное протекание рабочего процесса (безопасное воспламенение при запуске, быстрое и полное химическое превращение, устойчивость процесса сгорания);

- обеспечение боеготовности (возможность содержания в заправленном состоянии, пригодность к использованию в широком диапазоне климатических и погодных условий).

Химическая активность ракетных топлив является причиной ряда нежелательных свойств – взрывоопасности, нестабильности (разложения), агрессивности в отношении материалов, токсичного действия на персонал. Ракетные двигатели, как правило, рассчитаны на непродолжительное время работы, и вполне достаточно, если они в течение этого времени выдержат неблагоприятное воздействие ракетного топлива. Предотвращение вредных и опасных эффектов при хранении, заправке и других операциях с ракетным топливом достигается применением весьма стойких материалов, обеспечением герметичности и чистоты, введением в состав топлив стабилизаторов и ингибиторов коррозии, использованием для защиты личного состава специальных костюмов и противогазов, соблюдения строжайшего режима техники безопасности (рис. 5.2.).

### 5.3. ЖИДКИЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

**5.3.1. Типы жидких ракетных топлив.** ЖРД обычно работают на двухкомпонентных топливах, состоящих из жидкого окислителя и жидкого горючего. В их классификации определяющим является состав окислителя: как правило, он в большей мере, чем горючее, влияет на свойства топлива в ЖРД. Исключение представляет жидкий водород, который в качестве горючего определяет специфику ракетного топлива не в меньшей степени, чем окислитель, и обеспечивает получение на 15-20% более высокого удельного импульса, чем другие горючие компоненты.

*Высококипящие азотные* топлива (окислителями являются азотная кислота и азотный тетроксид) с точки зрения боеготовности обладают решающими преимуществами перед *криогенными кислородными* топливами (окислитель – жидкий кислород). Ограниченное применение из-за опасности обращения с ними имеют высококипящие двухкомпонентные *пероксидводородные* топлива и

Таблица 2

Теоретические характеристики некоторых двухкомпонентных жидких ракетных топлив  
при оптимальном соотношении компонентов

Компоненты топлива		Коэффициент избытка окислителя $\alpha$	Соотношение масс окислителя и горючего $\kappa$	Расчетная плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Молекулярная масса продуктов сгорания $\mu$	Температура продуктов сгорания $T_r$ , К	Показатель процесса расширения $\kappa$	Удельный импульс $J_{уд}$ , Н·с/кг при $p_k=6,8$ МПа	
окислитель	горючее							$p_c = p_H = 0,1$ МПа	$F_c/F_{кр} = 40$ , $p_H=60$
Азотная кислота $HNO_3$	Керосин*	0,92	4,93	1330	25,7	3147	1,22	2680	3060
	ТГ-02	0,91	4,25	1320	26,5	3120	1,23	2620	3090
	Гидразин	0,96	1,51	1250	20,9	3021	1,25	2740	3210
	НДМГ	0,90	3,01	1220	23,6	3147	1,23	2670	3150
Азотный тетроксид $N_2O_4$	Керосин*	0,83	4,05	1290	25,5	3438	1,25	2710	3200
	Гидразин	0,93	1,34	1220	20,8	3247	1,26	2850	3350
	НДМГ	0,84	2,56	1170	23,5	3415	1,25	2800	3310
	Аэрозин	0,88	1,97	1200	22,5	3300	1,25	2820	3330
Жидкий кислород* $O_2$	Керосин	0,74	2,57	1070	23,7	3686	1,25	2950	3520
	Аммиак	0,96	1,35	880	19,0	3073	1,23	2890	3460
	НДМГ	0,80	1,70	980	21,5	3608	1,25	3040	3610
	Параводород	0,50	3,97	280	10,0	2977	1,26	3840	4470
Пероксид водорода $H_2O_2$	Керосин	0,96	6,94	1340	22,0	3006	1,20	2730	3240
	Гидразин	0,98	2,09	1260	19,4	2927	1,22	2820	3320
	НДМГ	0,97	4,36	1240	21,1	3008	1,21	2790	3300
Жидкий фтор $F_2$	Аммиак	0,94	3,15	1170	19,0	4517	1,33	3520	4150
	Гидразин	0,99	2,36	1320	19,5	4727	1,33	3570	4220
	Параводород	8,13	0,43	1470	12,1	3988	1,33	4050	4690

\* Требуется принудительное вспенивание

Примечание. Состав горючих компонентов см. 5.3.

криогенные фторные топлива (окислитель – жидкий фтор и его соединения).

По удельному импульсу азотные и пероксидводородные топлива примерно на 10% хуже кислородных, причем азотная кислота на 1-2% уступает азотному тетроксиду. Фторные топлива на 5-20% лучше, чем кислородные, но чрезвычайно токсичны.

Кислородные топлива относятся к числу *несамовоспламеняющихся*, фторные – к *самовоспламеняющимся*, азотные и пероксидводородные – к той или иной группе в зависимости горючего компонента. Углеводородные горючие не самовоспламеняются с азотными окислителями, гидриды азота и их органические производные – самовоспламеняются. Криогенные горючие – жидкий водород и жидкий метан – применяются в сочетании с криогенными окислителями.

В некоторых ЖРД малых тяг применяется *однокомпонентное (унитарное) жидкое топливо*, которое выделяет энергию при разложении (пероксид водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ , гидразин  $\text{N}_2\text{H}_4$ ) или содержит способные к реакции горючие и окислительные элементы изопропилнитрат  $\text{C}_3\text{H}_7\text{ONO}_2$ ).

**5.3.2. Азотные топлива.** Важнейшие в современной ракетной технике окислители, жидкие при обычных температурах азотная кислота  $\text{HNO}_3$  и азотный тетроксид  $\text{N}_2\text{O}_4$  впервые были предложены в качестве компонентов топлива ЖРД в 1932 г. академиком Б. П. Глушко и с 1933 г. применялись на ряде отечественных ЖРД, в том числе на первом ракетном самолете-истребителе БИ-1 конструкции В.Ф. Болховитинова (1941 г.).

Доля кислорода, отдаваемая на соединение с горючим, составляет для обычно используемой 98%-ной азотной кислоты 0,623, а для тетроксида азота 0,696. Благодаря этому азотный тетроксид позволяет получить с теми же горючими несколько более высокий удельный импульс, чем азотная кислота.

По физическим свойствам (плотность 1,51, температура кипения  $+84^\circ\text{C}$ , замерзания  $-42^\circ\text{C}$ ) азотная кислота является хорошим, удобным для применения окислительным компонентом, но ее химическая нестабильность, коррозионная агрессивность и токсичность требуют ряда защитных мероприятий. Азотный тетроксид химически стабилен в чистом виде, но имеет худшие физические свойства: узкий диапазон температур, при которых он находится в жидком состоянии от  $-11$  до  $+21^\circ\text{C}$ , плотность 1,45. Но введение 20-30% тетроксида в кислоту обеспечивает получение окислителей марок АК (с цифровым указанием содержания тетроксида азота), имеющих более низкую температуру замерзания и более высокую плотность, чем каждое из этих веществ в чистом виде (рис. 5.3). Тетроксид азота препятствует разложению кислоты. Но при содержании более 50% тетроксида раствор расслаивается.

Вводимые в такой окислитель ингибиторы коррозии (фосфорная кислота  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , эффективная в жидкой фазе, фторид водорода  $\text{HF}$ , действующий в паровой фазе над уровнем топлива, йод и др.) не обеспечивают полной защиты от коррозии емкостей. Поэтому представляет интерес применение сухого азотного тетроксида, вообще не вызывающего коррозии. В емкостях с азотным тетроксидом должна обеспечиваться герметичность во избежание попадания влаги и распространения во вне очень ядовитых его паров (содержащих бурый дым  $\text{NO}_2$ ).

В составе азотных топлив используются главным образом азотсодержащие



горючие компоненты. Их преимущества по сравнению с углеводородными горючими – самовоспламеняемость, большее газообразование – считаются более существенными, чем недостатки – токсичность, коррозионная активность. Горючее ТГ-02 представляет собой смесь аминов – 50% ксилидина  $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_3\text{NH}_2$  и 50% триэтиламина  $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}$ . Такой состав близок к оптимальному, обеспечивающему минимум задержки самовоспламенения. Плотность его около 0,85. Впервые это горючее под названием *тонка* применялось на немецких ЖРД во время второй мировой войны.

Одним из важнейших горючих компонентов современной ракетной техники в сочетании с азотным тетроксидом является *несимметричный диметилгидразин (НДМГ)*  $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_2^*$ . Известно об его использовании в чистом виде и в смеси с гидразином  $\text{N}_2\text{H}_4$  (1:1) под наименованием *аэрозин* на целом ряде американских ЖРД (двигатели всех трех ступеней ракеты Титан-3С, посадочной ступени и взлета лунной кабины системы Аполлон и др.). Он обеспечивает более высокий удельный импульс, надежный запуск и устойчивое горение, чем ТГ-02, но более токсичен.

**5.3.3. Кислородные топлива.** Двухкомпонентное кислородно-водородное топливо впервые было предложено К. Э. Циолковским еще при разработке им первых схем космических ракет в 1903 г. Высокие параметры кислородных топлив (рис. 5.4), простота и дешевизна производства жидкого кислорода, с одной стороны, и недостаточная боеготовность, связанная с особенностями криогенного топлива, обусловили применение кислородных топлив главным образом на ЖРД ракет-носителей космических объектов. В отечественных РН применяются топлива Т-1с и РГ-1, которое состоит в основном из нафтенных (около 70%) и парафиновых углеводородов (25-30%) с содержанием ароматических углеводородов не более 5%. Кислород с НДМГ применен на двигателе второй ступени РН "Протон", с жидким параводородом на двигателях второй ступени ракеты "Энергия" и американской ракеты "Сатурн-5", использованной в экспедиции на Луну. Все эти горючие служат и для охлаждения камер.

Переохлаждение кислорода ниже температуры кипения, равной  $-183^\circ\text{C}$  при атмосферном давлении, позволяет уменьшить его потери при хранении, заправке и подготовке к пуску ракет, а также дает увеличение массы заправки (переохлажденный кислород имеет более высокую плотность). Для химического зажигания любого из кислородных топлив может быть использовано пусковое горючее – *триэтилалюминий*, который самовоспламеняется при контакте с кислородом, а для кислородно-водородного топлива – пусковой окислитель *трифторид хлора*  $\text{ClF}_3$ , самовоспламеняющийся при контакте с водородом.

**5.3.4. Фторные топлива.** Горючие при окислении фтором выделяют значительно больше тепла, чем при окислении кислородом, причем водород образует со фтором двухатомный газ  $\text{HF}$ , стойкость к диссоциации и показатель адиабаты расширения которого выше, чем трехатомного  $\text{H}_2\text{O}$ , что обеспечивает более высокий термический к.п.д. двигателя. Углерод со фтором менее эффективен – пятиатомные молекулы  $\text{CF}_4$  легко диссоциируют, отнимая часть

---

\* Его температура кипения  $63^\circ\text{C}$ , замерзания  $-57^\circ\text{C}$ , плотность  $792 \text{ кг/м}^3$  при  $20^\circ\text{C}$ .

выделенного тепла. Поэтому возможными перспективными считаются фторные топлива, горючим компонентом которых являются водород или гидриды, содержащие значительное количество водорода, но не углеводороды и их производные (см. табл. 2). Следует иметь в виду, что затрата фтора на окисление в 2,38 раза больше по массе, чем кислорода. Ввиду крайней токсичности фтора техника обращения с ним очень сложна. Это является главным препятствием к его использованию.

**5.3.5. Пероксидводородные топлива.** Высокий удельный импульс, обеспечиваемый пероксидводородными топливами (табл.2), объясняется значительным экзотермическим тепловым эффектом разложения окислителя (для 100%-ного пероксида водорода 1,6 МДж/кг). Он компенсирует меньшую, по сравнению с азотными окислителями, долю кислорода, отдаваемую на соединение с горючим, – 0,470. Однако взрывоопасность, свойственная веществам, которые разлагаются с выделением энергии, не позволяла практически применять безводный пероксид водорода. Разбавление же его водой до 95-80%-ной концентрации, при которой пероксид водорода, содержащий стабилизатор, достаточно устойчив, существенно снижает удельную тягу. Поэтому двухкомпонентные пероксидводородные топлива использовались редко.

**5.3.6. Унитарные жидкие топлива.** Чаще концентрированный пероксид водорода служит унитарным топливом – источником *парогаза*



Напоминанием об опасности пероксида водорода и необходимости строжайших конструктивных и эксплуатационных мер, исключающих его разложение, всегда будет взрыв торпеды с пероксидом водорода, повлекшим гибель подводного атомного крейсера "Курск".

Энергия, выделяемая при разложении в области концентраций, при которых происходит полное превращение пероксида водорода в парогаз (выше 62%), определяется из уравнения:

$$H_u = [\text{H}_2\text{O}_2] \cdot 1,6 - [\text{H}_2\text{O}] \cdot 2,5, \text{ МДж/кг}$$

(в квадратных скобках – массовая доля соответствующего вещества).

Управляемое разложение пероксида водорода под действием твердых или жидких катализаторов производится в парогазогенераторе турбонасосных агрегатов и в двигателях малых тяг, в том числе индивидуальных для передвижения космонавта в открытом космосе.

Не только горючим, но и унитарным топливом служит гидразин  $\text{N}_2\text{H}_2$ , так как он под действием катализатора (оксида алюминия, пропитанного иридием) разлагается на водород, азот и аммиак. Тепловой эффект разложения при высокой температуре примерно такой же, как для пероксида водорода, но полезная работа и удельный импульс, которые можно получить от продуктов разложения гидразина, на 15-20% выше благодаря лучшим их термодинамическим свойствам.

Унитарными топливами являются также изопропилнитрат  $\text{C}_3\text{H}_7\text{ONO}_2$ ,

оксид этилена  $\text{H}_2\text{C} \begin{array}{c} \diagup \text{O} \diagdown \\ \text{---} \end{array} \text{CH}_2$  и другие вещества с экзотермическим эффектом разложения и газификации.

**5.3.7. Некоторые эксплуатационные особенности жидких ракетных топлив.** Надежный запуск ЖРД обеспечивается применением самовоспламеняющихся сочетаний горючего с окислителем, отмеченных в табл. 2, в качестве рабочего или пускового топлива. При контакте самовоспламеняющихся компонентов, впрыскиваемых в камеру сгорания, образуется горячий парогаз – смесь химически активных продуктов их разложения и паров. Развитие реакций в парогазе приводит к появлению очагов пламени, которое быстро охватывает всю массу накопившейся горючей смеси. При этом обычно резко нарастает давление, происходит взрыв ("пушечный" запуск). Чем больше задержка самовоспламенения, тем выше пик давления. Во избежание разрушения двигателя задержка не должна быть больше 0,02-0,03 с. Близкой к этим опасным значениям она может быть в случае обводнения или несоответствия состава ТГ-02 (смесь двух аминов) в сочетании с окислителями АК. Другие самовоспламеняющиеся горючие обеспечивают с азотными окислителями задержку самовоспламенения порядка 0,005-0,01 с, что гарантирует безопасный запуск. После первого пика давления происходит его спад и новое накопление топлива, в течение примерно 0,5-1,0 с повторяется процесс с постепенным уменьшением амплитуды в форме низкочастотных колебаний, мешающих быстрому выходу на рабочий режим.

В случае применения несамовоспламеняющихся кислородных топлив или азотной кислоты с керосином самовоспламеняющиеся компоненты могут быть использованы в качестве пусковых для образования начального очага пламени, после чего процесс схож с происходящим при самовоспламенении.

При режимной работе ЖРД сокращение задержки химического превращения топлива повышает устойчивость горения, способствует уменьшению пульсаций давления.

Камеры сгорания и сопла ЖРД охлаждаются, как правило, одним из компонентов топлива. Отбор тепла от горячей стенки происходит в основном при кипении тонкого слоя охладителя, непосредственно прилетающего к стенке. Образующиеся пузырьки пара конденсируются в потоке жидкости и передают ей тепло. Эффективность охлаждающего компонента тем больше, чем выше его теплоемкость, теплопроводность и теплота испарения. Количество энергии, которое может поглотить 1 кг компонента топлива при охлаждении ЖРД – *тепло-восприимчивость* компонента – зависит также от температуры  $T_k$  его кипения или разложения:

$$Q = C_{\text{ж}} (T_k - T_{\text{вх}}) \quad (5.5)$$

где  $C_{\text{ж}}$  – теплоемкость жидкости,  $T_{\text{вх}}$  – ее температура на входе в охлаждающую рубашку. Непригоден для охлаждения пероксид водорода с низкой температурой разложения. Но при слишком высоких  $T_k > 500 - 630$  К интенсивность пузырькового режима охлаждения недостаточна и происходит перегрев камеры, опасный для ее прочности.

Высокая теплоемкость и теплопроводность не только жидкого, но и газообразного водорода обеспечивает его эффективность для охлаждения ЖРД в широком диапазоне температур.

Хорошей совокупностью качеств охладителя обладает азотная кислота, однако некоторые из вводимых в нее ингибиторов коррозии дают отложения внутри охлаждающей рубашки, а без ингибиторов отложения образуются из продуктов коррозии. Несколько меньшую теплоемкость и теплопроводность имеют углеводородные горючие. Для охлаждения камер сгорания можно применять только те из них, которые обладают высокой термостабильностью, исключая образование углеродистых осадков.

Большинство высококипящих компонентов ракетного топлива агрессивны в отношении материалов. Азотная кислота и пероксид водорода вызывают коррозию почти всех металлов и обугливают обычные прокладочные материалы, шланги из резины и текстильных тканей. Выдерживают контакт с концентрированной азотной кислотой и пероксидом водорода только чистый алюминий и кислотостойкие высоколегированные хромоникелевые стали, кислотостойкие пластмассы (например, полимеры фторпроизводных углеводородов) и асбест. Горючие, состоящие из аминов, гидразина и его производных со щелочными свойствами, вызывают коррозию меди и медных сплавов. Поэтому в аппаратуре, предназначенной для работы с этими горючими, эти металлы обычно не применяют. Азотный тетроксид, углеводородные горючие и криогенные компоненты практически безопасны в отношении коррозии металлов.

Вызываемое криогенными компонентами охлаждение до 20-100 К делает хрупкими почти все стали, а также резину и многие пластмассы. Удовлетворительные механические свойства при этих температурах имеют хромоникелевые аустенитные стали, алюминийевые и медные сплавы; из них и изготавливают емкости и аппаратуру для криогенных компонентов. При использовании криогенных компонентов топлив необходимы тепловая защита, предварительное охлаждение топливных систем при заправке, ограничение срока хранения в заправленном состоянии во избежание переохлаждения аппаратуры и внешнего обледенения ЛА.

Особыми свойствами, значительно отличающимися от свойств других компонентов ракетного топлива, обладает жидкий водород. Его объемный расход в несколько раз больше, чем окислителя, тогда как с другими горючими имеет место обратное соотношение.

## **5.4. ТВЕРДЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА**

**5.4.1. Особые свойства твердых ракетных топлив и требования к их качеству.** Особенности твердых ракетных топлив связаны прежде всего с процессом их горения и существенным влиянием механических свойств топлива на рабечий процесс.

Топливный заряд РДТТ обычно представляет собой монолитный цилиндр с каналом по оси. Для обеспечения неизменной площади горящей поверхности канала он выполняется профилированным (рис. 5.5). Это необходимо для получения одной и той же тяги РДТТ в течение всего времени его работы.

Сгорание твердого ракетного топлива происходит с поверхности канала параллельными слоями. Фактически горит не само твердое вещество, а продукты его газификации: фронт пламени (светящаяся зона) устанавливается на рас-



стоянии порядка десятой доли миллиметра от поверхности топливного заряда. Тепловой поток от пламени прогревает тонкий поверхностный слой топлива и возбуждает в нем реакции разложения, частичного окисления и др., которые сопровождаются вспениванием, расплавлением, испарением, дымообразованием.

*Скорость смещения открытой поверхности твердого топлива по нормали (толщина слоя, выгорающего за секунду) называется линейной скоростью горения ( $w_r$ ).* Величина ее – от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в секунду. Она зависит от химической активности топлива, от теплоотдачи пламени, а также от температуры, способной вызвать газификацию данного состава топлива (испарение или разложение). Чем эта температура выше, тем ближе пламя к твердой поверхности и больше скорость горения. Имеет значение также микроструктура топлива: от размера зерен окислителя в смесевом топливе зависит поверхность контакта с горючим, по которой идут реакции в зоне прогрева, добавка катализаторов (солей, гидридов), замедлителей (например, парафина), красителей (обычно сажи, способствующей поглощению теплового излучения), тугоплавких металлов (вольфрама и др.).

Главное требование к твердому ракетному топливу, связанное с характеристиками его горения, – возможно меньшая зависимость скорости горения от давления в камере ( $p_k$ ) и от исходной температуры топлива. Обычно их влияние соответственно выражают:

$$w_r = k_t p_k^n \quad (5.6)$$

где показатель степени  $n \approx 0,1-0,8$  (его называют показателем горения), а величина  $k_t$  является функцией температуры топлива. Топлива, малочувствительные к давлению (с низким показателем горения  $n$ ), обеспечивают лучшую устойчивость режима двигателя (меньше колебания давления и тяги). Совершенно недопустимо  $n \geq 1$  – топливо с таким показателем горения вызвало бы взрыв двигателя при любом случайном повышении давления или затухание заряда при понижении давления.

Чем выше исходная температура топлива, тем интенсивней его разложение, больше скорость горения, секундное газообразование и давление в камере сгорания. Повышение температуры топлива на 1 К вызывает увеличение давления на 0,5-2,2%. При использовании топлив, малочувствительных к температуре, проще обеспечить требуемый режим двигателя и меньше разброс при боевом применении ракет.

Слишком высокая химическая активность и высокая теплотворность твердого топлива могут создать условия для возникновения детонации при резком скачке давления и температуры, в том числе при сильном ударе, интенсивном электрическом разряде и т. п. Чтобы исключить ее возможность, состав высококалорийных топлив подбирается заведомо "богатым" ( $\alpha < 1$ ).

При хранении, перевозке, в полете геометрия заряда не должна изменяться, так как нерасчетное увеличение площади поверхности горения приводит в лучшем случае к изменению режима двигателя и программы полета, а в худшем – к взрыву или остановке двигателя. Поэтому твердое ракетное топливо должно обладать хорошими механическими свойствами – высокой прочностью, ударной вязкостью и эластичностью как при высоких, так и при низких



температурах, чтобы высокое давление, инерционные перегрузки и термическая деформация не вызвали трещин и разрушения заряда. Топливо должно представлять не рыхлую, а сплошную массу, без пор и микроканалов, по которым горячие газы могли бы проникнуть внутрь заряда и вызвать неуправляемые процессы разложения и горения. Топливо для крупных зарядов не должно быть склонно к ползучести или усадке, ему должна быть свойственна поверхностная сила сцепления (*адгезия*) с материалом корпуса камеры и негорючим покрытием (ингибитором), который профилирует рабочие участки заряда.

Из числа требований, предъявляемых ко всем ракетным топливам, для твердых топлив особенно существенным является требование высокой плотности. Оно обусловлено тем, что по удельному импульсу твердые топлива уступают жидким, а запас твердого топлива ограничивается объемом камеры сгорания двигателя. Фактическая плотность твердых топлив может превышать расчетную плотность двухкомпонентных жидких топлив в 1,5-2 раза и более, что позволяет обеспечить не меньший импульс тяги, чем с жидким топливом.

**5.4.2. Смесевые топлива.** Смесевые твердые ракетные топлива представляют собой механические смеси кристаллического окислителя (65-80%) с полимерным горючим (10-20%), которое одновременно выполняет функцию *связующего*, скрепляющего массу мелких частиц окислителя и обеспечивающего твердому топливу необходимые механические свойства. Кроме того, они обычно содержат 5-15% металла, повышающего теплотворность, и до 10% присадок. По удельному импульсу, характеристикам горения, возможности формировать крупные заряды смесевые топлива лучше двухосновных (коллоидных) топлив. Эти качества обеспечивают смесевым топливам все возрастающую роль в ракетной технике.

Окислителем в составе смесевых топлив служат кислородсодержащие соли хлорной и азотной кислот – перхлораты аммония или калия, нитраты аммония, калия или натрия. Общее содержание кислорода в перхлоратах меньше, чем в соответствующих нитратах (64,3% в остатке хлорной кислоты  $\text{ClO}_4$  и 77,4% в остатке азотной кислоты  $\text{NO}_3$ ). Однако металл перхлоратов или часть водорода из группы  $\text{NH}_4$  связывается хлором, что позволяет окислить больше горючего. Нитраты гигроскопичны (что отражается на механических свойствах топлива). Серьезным недостатком нитрата аммония является изменение его кристаллической структуры с изменением температуры, которое сопровождается изменением объема и образованием трещин в заряде.

Более эффективными окислителями, позволяющими на 10% повысить удельный импульс твердого топлива, являются перхлорат нитрония  $\text{NO}_2\text{ClO}_4$  и гексанитроэтан  $\text{C}_2(\text{NO}_2)_6$  с большим содержанием окислительных элементов и высокой положительной энтальпией. Но они совместимы лишь с немногими горючими, усложняют технологию изготовления и стоимость топливных зарядов.

Горючим-связующим в составе смесевых твердых топлив являются различные синтетические полимеры типа каучука, смол, пластмасс. Наибольшее применение из них находит *полиуретан*  $(\text{NH}\cdot\text{COO}\cdot\text{C}_n\text{H}_m)_x$  – каучукообразный полимер со сравнительно невысокими энергетическими характеристиками, но с хорошими механическими свойствами, в том числе морозоустойчивостью и ад-

гезией, обеспечивающей прочное соединение заряда со стенкой камеры сгорания. При длительном хранении, однако, происходит постепенное ухудшение его механических свойств. Бутадиеновый каучук  $(C_4H_6)_x$  и стиролбутадиеновый каучук  $(C_4H_6 \cdot C_2H_3 \cdot C_6H_5)_x$  имеют лучшие энергетические свойства, чем полиуретан, но из-за высокого стехиометрического коэффициента их не вводят в таком количестве, которое обеспечивает получение требуемых механических свойств заряда.

Повышение энергетических показателей смесового топлива достигается добавкой алюминия или других металлов. Для их сгорания требуется мало окислителя, благодаря чему на единицу веса они дают в 2-2,5 раза больше тепла, чем полимеры. Последние же из-за введения металлов лишаются небольшой доли окислителя. Теплота, выделяемая при горении металлов, передается газообразным продуктам сгорания основной массы топлива, повышая температуру газа и удельный импульс двигателя. Сами же продукты сгорания металлов образуются в виде конденсированных частиц (дым, а не газ), что приводит к потерям удельного импульса. Существует некоторое оптимальное содержание металлов в топливе (порядка 10-20%), обеспечивающее максимум удельного импульса. Однако его трудно достигнуть, потому что металл, как и окислитель, нуждается в связующем веществе. Чем больше полимерного горючего связующего в составе топлива, тем больше в него можно ввести металлического горючего при сохранении удовлетворительных механических свойств топлива. В связи с этим смесевые топлива, как правило, сильно обогащены горючим (примерно до  $\alpha = 0,5-0,6$ ) (рис. 5.6).

**5.4.3. Двухосновные (коллоидные) твердые ракетные топлива.** Их также называют *баллиститами* и *нитроцеллюлозными* топливами. Микроструктура этих топлив коллоидная с характерными размерами сопряженных частиц порядка 0,1 мкм. Двумя основами этих топлив являются твердая, но рыхлая в исходном виде нитроцеллюлоза  $[C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_x$  (природная хлопковая вата, обработанная азотной кислотой) – дисперсная фаза и жидкая дисперсионная среда – нитроглицерин, который связывает ее в сплошную твердую массу. Молекулы каждой из двух основ содержат одновременно и горючую углеводородную часть и готовый к взаимодействию с ней кислород, отделенный от горючих элементов "барьером" из атомов азота (группы –  $NO_2$ ). При нагревании или ударе "барьер" разрушается, атомы азота соединяются в газовые молекулы  $N_2$ , а освободившиеся атомы кислорода бурно реагируют с атомами горючих элементов – водорода и углерода: происходит сгорание. Микронеоднородность коллоидной структуры топлива при этом препятствует взрыву, склонность к которому проявляет каждая из исходных его составных частей в отдельности. Чистая нитроцеллюлоза взрывается из-за огромной поверхности рыхлого пористого вещества, по которой распространяется горение, а нитроглицерин детонирует при ударе.

В нитроцеллюлозе недостаточно кислорода для превращения всего углерода и водорода в конечные продукты окисления ( $\alpha < 0$ ). Чем выше степень нитрации, тем больше их окисляется и выше теплотворность топлива. Однако повышение степени нитрации ухудшает растворимость нитроцеллюлозы в нит-

роглицерине и увеличивает гигроскопичность (количество поглощенной влаги из воздуха может достигать 2%). Теплотворность нитроглицерина примерно в 1,5 раза больше, чем нитроцеллюлозы. В нитроглицерине содержится избыток кислорода ( $\alpha = 1,06$ ), при сгорании двухосновного топлива он идет на окисление горючих элементов нитроцеллюлозы. Стехиометрический состав двухосновного топлива ( $\alpha = 1$ ) – 89,5% нитроглицерина и 10,5% нитроцеллюлозы, максимум же удельной тяги из-за диссоциации газов получается при 50% нитроглицерина. Но топливо, содержащее более 43,5% нитроглицерина, непригодно по прочности и стабильности: оно расслаивается с выделением жидкого нитроглицерина.

В двухосновное топливо вводится до 10% присадок: эпоксидная смола для упрочнения заряда, цантралит (диэтилдифенилкарбамид)  $\text{CO}(\text{N}\cdot\text{C}_6\text{H}_5\cdot\text{C}_2\text{H}_5)_2$  и дифениламин  $\text{N}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$  для химической стабилизации топлива, воск или вазелин для облегчения прессования, графит против прогрева заряда излучением и динитротолуол  $\text{C}_6\text{H}_3\text{CH}_3(\text{NO}_2)_2$  для защиты от увлажнения, а так же для уменьшения скорости горения и др.

Технология приготовления двухосновных твердых топливных зарядов хорошо отработана, что является одной из причин их применения, несмотря на худшие энергетические показатели, чем у смесевых топлив. Для повышения энергетических свойств двухосновных топлив в их состав иногда вводятся алюминиевый порошок и твердый окислитель, например, перхлорат аммония.

Для запуска в РДТТ имеется воспламеняющее устройство. Применяют также воспламеняющие составы – черный (дымный) порох или пиротехнические смеси, продукты сгорания которых содержат раскаленные частицы. Их излучение и прямой контакт с разжигаемой поверхностью канала топливного заряда обеспечивают его быстрый нагрев, разложение топлива, повышение давления в канале до минимально необходимого для горения топлива. Воспламеняющий состав поджигается электрическим пирозапалом.

## 5.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

**5.5.1. Обеспечение чистоты компонентов жидкого топлива.** Загрязнение и обводнение жидких компонентов ракетного топлива может привести не только к ухудшению их качества, но и к резко выраженным опасным последствиям. Попадание воды в компоненты с кислыми и щелочными свойствами усиливает электрохимическую коррозию и может привести к течи емкостей, при смешении воды с азотными окислителями происходит разогрев и обильное парообразование.

Продукты коррозии, технологические загрязнения и атмосферная пыль являются катализаторами разложения пероксида водорода, развивающегося с саморазгоном вплоть до взрыва при достижении температуры  $175^\circ\text{C}$ . Это заставляет подвергать *пассивации* соприкасающиеся с ним поверхности (обрабатывать веществами, образующими неактивную пленку), тщательно фильтровать сжатые газы, ежедневно проверять, не повысилась ли температура пероксида водорода выше окружающей температуры.

При работе с жидким кислородом недопустимо загрязнение тары и топливной аппаратуры даже следами жиров и масел, при контакте с которыми ки-

слород взрывает. К взрыву может привести конденсация и кристаллизация в криогенных компонентах таких веществ, которые могут с ними бурно реагировать: ацетилена (из воздуха) и масла (из насосов) в жидком кислороде, кислорода в жидком водороде и т. д.

**5.5.2. Обеспечение пожарной безопасности.** Большинство горючих, применяемых в ракетной технике, по огнеопасности существенно не отличается от бензинов, керосинов. Но емкости и заправочные средства с такими горючими, которые самовоспламеняются при контакте с азотными окислителями (НДМГ, ТГ-02 и др.), размещаются на значительном удалении от них. Азотные окислители и пероксид водорода вызывают самовоспламенение древесины, тканей, сухих листьев, травы и т. д. Площадки, полы помещений, где производится работа с этими окислителями, покрывают кислотоупорным бетоном (но не асфальтом), а кузова автомобилей снабжают металлическим кислотоупорным поддоном.

Вблизи емкостей с жидким кислородом воздух содержит больше газообразного кислорода, чем обычно, и поэтому больше пожарная опасность от любого внешнего источника пламени. Кислород адсорбируется хлопчатобумажными тканями, задерживается в волосах (в том числе на бровях и ресницах). После пребывания в атмосфере с повышенным содержанием кислорода нельзя курить и подходить к открытому огню.

Принципы и средства тушения горючих компонентов ракетных топлив такие же, как обычных нефтяных горючих: их тушат углекислотными пенными огнетушителями или химическими огнегасительными жидкостями, но не водой. В противоположность этому для тушения пожара, вызванного жидкими окислителями, применяется только вода: она разбавляет окислитель, снижает его активность и резко охлаждает очаг горения. Огнегасительные средства, применяемые для тушения горючих, при этом бесполезны, так как их действие основано главным образом на изоляции очага горения от доступа кислорода воздуха, а при наличии окислителя воздух для горения требуется.

**5.5.3. Защита от токсичного действия.** Многие компоненты ракетных топлив являются смертельными ядами или вызывают тяжелые поражения организма. Технические средства хранения, перевозки и заправки ракетных топлив выполняются таким образом, чтобы предотвратить возможность контакта людей с опасными веществами. Недопустим слив компонентов ракетного топлива на грунт. Любые проливы опасных компонентов необходимо быстро смыть водой и нейтрализовать их остатки химическими средствами.

Вполне обеспечивают защиту от вредного действия токсичных ракетных топлив специальные изолирующие костюмы, специальные сапоги и перчатки из стойких к агрессивным веществам материалов, герметичные очки, а при необходимости и противогазы (фильтрующий или изолирующий). После работы специальная одежда снимается, принимается душ и заменяется белье. В случае облива одежда нейтрализуется раствором щелочи или уксусной кислоты.

Твердое ракетное топливо по существу является частью двигательной установки и обращение с ним нормируется правилами обращения с двигателем. Прежде всего принимаются охранные меры.

Не допускаются удары, толчки, тряска, падения. Случайно упавшие с любой высоты изделие не допускается к применению, так как из-за возможного появления трещин в топливном заряде возникает опасность взрыва при работе двигателя. Сопла двигателей закрывают герметичными заглушками против попадания влаги. Условия хранения должны обеспечить практическое постоянство температуры, так как она влияет на скорость горения топлива, а ее колебания могут вызвать изменения в его микроструктуре.

Предусмотрен неразрушающий контроль состояния топливных зарядов ультразвуковым и иными специальными методами.

При запусках РДТТ ввиду образования в продуктах горения большинства топлив токсичного и весьма агрессивного хлорида водорода  $\text{HCl}$  стартовые системы оборудуются соответствующими средствами защиты, промывки и нейтрализации.

Для подготовки к применению мелкогабаритных изделий, пусковых зарядов, воспламенительных систем используют хорошо освещенные помещения с просторными проходами, деревянным полом, стеллажи с бортами и мягкой обивкой, мягкую обувь. Хранят малогабаритные РДТГ в деревянных ящиках с внутренней обивкой.

Системы инструктажей, оборудование рабочих мест, контроля, медицинского освидетельствования и других мер позволяет исключить чрезвычайные происшествия при повседневном обслуживании ракетной техники.



## Глава 6

### ТРЕНИЕ И ИЗНОС

#### 6.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

**6.1.1. Трибосистема.** Разнообразные узлы трения двигателей, механизмов и агрегатов – подшипники скольжения и качения, зубчатая и червячная передачи, поршень в цилиндре и множество других устройств с взаимно перемещающимися сопряженными деталями, и смазочный материал, находящийся в контакте с ними, представляют собой в теоретическом плане *трибосистему*. В ней происходят подчиняющиеся общим законам физико-химические процессы и явления. Их изучает новая отрасль науки – трибология (tribo греч. – растираю), возникшая вначале параллельно с химмотологией, но являющаяся по существу частью химмотологии. Главным предметом изучения являются процессы трения, изнашивания, смазочного действия масел и других материалов, вводимых между трущимися деталями.

Трибосистемой считается система подвижно сочлененных деталей – твердых тел и введенного между ними смазочного материала. Решающую роль в характеристиках трибосистемы играют поверхности контакта – границы раздела твердых тел и жидкой фазы, а при ее отсутствии – поверхности контакта твердых тел друг с другом.

Исходной позицией в определении характеристик трибосистемы является исследование одновременно протекающих физико-химических процессов и физических явлений на элементарном участке поверхности при движении по ней контртела. Это процессы адсорбции молекул смазочного материала на поверхностях трения, имеющие электростатическую основу; модификации поверхностей трения; срезания микровыступов, сопровождающегося "температурными вспышками" порядка  $1000^{\circ}\text{C}$ , упругой и пластической деформацией; накопления частиц износа в зоне трения; деструкции молекул, окисления, карбонизации; иногда – электрические разряды. Сложность анализа этих процессов обусловлена влиянием шероховатости поверхности, химического состава трущихся деталей и смазочного материала, прочностных свойств трущихся поверхностей, вязкости смазочного материала и других факторов.

**6.1.2. Внешнее трение.** Внешнее трение – это сопротивление относительному перемещению, возникающему между движущимися телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним и сопровождаемое диссипацией энергии (рис. 6.1).

Из-за неровностей микрорельефа реальных тел действительный контакт между ними имеет место только на отдельных участках, составляющих незначительную долю номинальной поверхности соприкосновения. На таких участках под действием прижимающей силы возникает очень высокое истинное давление, происходит внедрение микронеровностей одного тела в материал другого, образуется множество дискретных (отдельных, прерывистых) фрикционных связей – "мостиков" между телами. Их возникновение и разрушение при скольжении тел проявляется в форме силы трения и фрикционного изнашивания поверхности.

В первом приближении *сила внешнего трения твердых тел пропорциональна нормальной силе*, с которой перемещаемое тело прижимается к поверхности контртела

$$F = f P, \quad (6.1)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

При сухом трении (отсутствии смазочного материала) в воздушной среде минимальные значения коэффициента трения ( $f = 0,15-0,20$ ) имеют место при трении стальных, чугунных, бронзовых поверхностей и их сочетаний. Для большинства других металлов  $f = 0,3-0,8$ , а при трении меди по меди коэффициент трения  $f = 1,3$ , сила трения больше прижимающей силы. Введение граничной смазки – тончайшей пленки смазочного материала, при наличии которой сохраняется твердый контакт, снижает коэффициент трения в несколько раз ( $f = 0,01-0,1$ ). Как видно из формулы (6.1), коэффициент внешнего трения не зависит ни от площади контакта, ни от скорости относительного перемещения тел.

**6.1.3. Роль смазочного материала.** Смазочными материалами являются вещества, специально вводимые в трибосистему между подвижно сочлененными деталями в целях уменьшения трения и его вредных последствий. В авиационной технике используют жидкие смазочные материалы – масла и двухфазные (микронеоднородные) пластичные смазки.

Благодаря смазке непроизводительная затрата мощности на преодоление трения снижается в десятки, сотни раз, уменьшается износ деталей и обеспечивается долговечность машин. Узлы трения авиационных двигателей и силовых передач летательных аппаратов при работе без смазки разрушились бы в течение нескольких секунд из-за задира трущихся поверхностей и заклинивания или сваривания выделенным при трении теплом.

*Антифрикционное* (уменьшающее трение) действие смазочного материала основано на его *смазочной способности* и *вязкостных свойствах*. Смазочная способность обеспечивает *граничную смазку* поверхности контакта деталей адсорбированными пленками, а вязкостные свойства – *гидродинамическую смазку* непрерывным слоем жидкости, полностью разделяющим сочлененные детали.

Трение при граничной смазке остается по своему характеру внешним, как и при отсутствии смазки (его отличительный признак – скачок скорости на поверхности контакта). Смазочная способность играет основную роль в понижении износа подшипников качения и узлов трения силовых передач, а при трении скольжения проявляется только на малой скорости (в частности, при пуске и остановке) и в случае высокого удельного давления.

Гидродинамическая смазка (ее называют также жидкостной) коренным образом меняет характер трения: внешнее трение твердых тел заменяется внутренним трением жидкости, при котором происходит плавное изменение скорости от слоя к слою в направлении, нормальном к поверхности скольжения.

## 6.2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СМАЗКА

**6.2.1. Вязкостные свойства.** В узлах трения с гидродинамическим режимом смазки взаимно перемещающиеся детали не соприкасаются, трение происходит между слоями разделяющей их жидкости. При постоянном градиенте

скорости в зазоре  $dv/dh = \text{const}$  сила трения  $F$ , приходящаяся на единицу поверхности скольжения  $S$ , пропорциональна динамической вязкости смазочного материала  $\mu$ , скорости скольжения трущихся тел относительно друг друга  $v$  и обратно пропорциональна толщине слоя масла между поверхностями  $h$ :

$$F/S = \mu(v/h) \quad (6.2)$$

Эта упрощенная формула была предложена автором гидродинамической теории смазки проф. Н. П. Петровым (1883 г.) для определения силы трения в подшипниках скольжения.

В трущейся паре вал-подшипник масло, обволакивающее вал, вследствие внутреннего трения увлекает соседние слои масла в клиновидную часть зазора. Создается давление, приподнимающее вал. Вращающийся вал "накачивает" под себя масло и всплывает на созданием им самим масляном потоке. Чем выше вязкость масла, тем большую нагрузку может выдержать масляный клин [17]. Аналогично этому при возвратно-поступательном движении поршня в цилиндре силы внутреннего трения затягивают в зазор прилегающие к поршню слои масла. Создается давление, которое оттесняет поршень от стенки цилиндра; поперечные силы передаются от поршня стенке цилиндра через слой масла без твердого контакта.

Максимальное удельное давление  $p_{уд} = P/S$ , которое может выдержать гидродинамический слой смазки, выражается полуэмпирической формулой:

$$p_{уд} = \mu v / \Phi \quad (6.3)$$

$$\mu n / p_{уд} = \Phi, \quad (6.3')$$

где  $n$  – частота вращения в минуту,  $\Phi$  – функция геометрии и условий работы узла трения, определяемая экспериментально.

Из формулы (6.3) следует, что *несущая способность* гидродинамического смазочного слоя так же, как и сила жидкостного трения по формуле (6.2), *увеличивается с повышением вязкости смазочного материала  $\mu$  и скорости скольжения  $v$* . Таким образом, с точки зрения выбора вязкости масла создается противоречие. С одной стороны, желательно использовать масло возможно большей вязкости, чтобы увеличить несущую способность (допустимое  $p_{уд}$ ) и, следовательно, надежность гидродинамической смазки. С другой стороны, чем выше вязкость масла, тем больше сила трения и потеря мощности на преодоление трения, в связи с чем желательно применять менее вязкие масла.

Исходя из этого и учитывая зависимость вязкости масел от температуры, для каждого двигателя или механизма экспериментальным путем подбирают масло с минимальной вязкостью, при которой обеспечивается жидкостное трение на самом высоком температурном режиме его работы. Как видно из формулы (6.3), она должна быть тем больше, чем ниже скоростной режим  $n$  и выше удельное давление  $p_{уд}$ .

**6.2.2. Условия гидродинамического режима смазки.** Для широкого диапазона нагрузки и частоты вращения существует оптимальное значение определяемого формулой (6.3') параметра  $\mu n / p_{уд}$ , которому соответствуют наименьшие потери мощности на трение. При уменьшении  $\mu$  или  $n$ , как и при увеличении  $p_{уд}$ , мощность трения растет из-за возникновения твердого контак-

та, а с увеличением  $\mu n/p_{уд}$  сверх оптимального значения возрастают силы внутреннего трения и затрата мощности на их преодоление.

Представленная на рис. 6.2 зависимость коэффициента трения  $f$  от параметра  $\mu n/p_{уд}$  (кривая Штрибека) показывает, что область гидродинамических режимов смазки и оптимальный режим зависят от величины  $\lambda$ , равной отношению толщины масляного слоя (или пленки) к высоте шероховатости трущихся тел. Эластогидродинамический режим смазки зависит от упругих свойств элементов трибосистемы [14].

**6.2.3. Влияние давления.** При высоком удельном давлении вязкость масла возрастает по экспоненциальному закону:

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p_{уд}}, \quad (6.4)$$

(где  $\mu_0$  – вязкость при атмосферном давлении; коэффициент  $\alpha \approx 0,023-0,030$  для нефтяных масел, большие значения соответствуют более вязким маслам).

Рост вязкости нефтяных масел становится заметным при  $p_{уд} > 10$  МПа, что вполне реально для узлов трения и способствует сохранению гидродинамической смазки при повышении нагрузки. Вязкость некоторых синтетических масел начинает расти только при  $p_{уд} > 100$  МПа (например, метил- и этил полисилоксанов). Темп повышения вязкости сначала невелик, но по мере роста давления вязкость увеличивается все более резко, вплоть до полного затвердения масла. С повышением температуры масла влияние давления на вязкость ослабевает.

**6.2.4. Роль вязкости в подшипниках качения.** Существует некоторая оптимальная вязкость масла, обычно невысокая, которая обеспечивает наибольшую долговечность подшипника качения. При меньшей вязкости не обеспечивается гидродинамическая смазка сепараторов и бортиков беговых дорожек, ухудшается граничная смазка из-за уменьшения толщины граничной пленки на участках твердого контакта. Слишком высокая вязкость увеличивает сопротивление качению шариков и роликов, особенно при обильной подаче масла, и усиливает нагрев подшипников из-за трения. Одновременно ослабляется охлаждающее действие масла. Это может привести к отпуску и уменьшению твердости стали, а иногда даже вызвать перекристаллизацию, изменение размеров и искажение формы шариков и роликов, сепараторов.

**6.2.5. Влияние на эксплуатационные свойства масел.** Нормы вязкости масел устанавливаются при температуре, более или менее соответствующей условиям их применения, чаще всего  $100^{\circ}\text{C}$  или  $50^{\circ}\text{C}$ . Однако узлы трения не слишком чувствительны к вязкости смазочных материалов ввиду ее *саморегулирования* в широком диапазоне изменения эксплуатационных факторов. Когда вязкость слишком высока (например, из-за низкой температуры масла), то велика и работа трения. Она переходит в тепло, смазочный материал нагревается и вязкость его понижается. То же происходит при увеличении частоты вращения: когда гидродинамический режим смазки обеспечивается меньшей вязкостью, снижается сопротивление.

Вязкость смазочных масел влияет не только на режим смазки, но и на ряд эксплуатационных характеристик – потребный крутящий момент при пуске двигателя, циркуляцию масла в системе смазки, охлаждающее действие масла,



утечку его через уплотнения и т. д. Влияние на одни из этих характеристик проявляется при низких, а на другие – при высоких температурах масла. На рис. 6.3 приведена примерная схема эксплуатационных требований к вязкостно-температурным свойствам масла. Из схемы видно, что степень соответствия этим требованиям определяется *пологостью вязкостно-температурной характеристики*.

### 6.3. ГРАНИЧНАЯ СМАЗКА

**6.3.1. Природа смазочной способности.** Физико-химическая основа образования граничной пленки и, следовательно, смазочной способности – явления адсорбции и хемосорбции (термин образован из латинских слов *chemie* – химия и *sorbere* – поглощать, т.е. "химическое поглощение" частиц масла твердым телом).

Сущность *адсорбции* заключается в электрическом взаимодействии ионов или электрически заряженных частей молекул жидкости с электрическим полем атомов и ионов металла, образующих твердую поверхность. Например, отрицательно заряженные части молекул жидкости притягиваются к положительно заряженным ионам поверхности металла, к первому ряду полярных молекул пристраиваются следующие (рис. 3.11). В результате на поверхности металла из масла собираются такие вещества, в молекулах которых электрические заряды распределены неравномерно (их называют *поверхностноактивными*). К их числу относится большинство синтетических масел, за исключением полисилоксановых.

Носителями смазочной способности нефтяного масла являются содержащиеся в нем примеси поверхностноактивных веществ – органических кислот, фенолов, смолистых и других органических соединений, содержащих кислород, серу и азот. Они проявляют значительно большие силы сцепления с металлической поверхностью, чем углеводородная основа нефтяного масла, молекулы которого неполярны (электрический центр тяжести их положительного и отрицательного зарядов практически совпадает). Если в масле недостаточно собственных поверхностноактивных веществ, они могут быть добавлены в него искусственно; соответствующие присадки к маслу называются *противоизносными*.

**6.3.2. Граничная пленка.** Адсорбированный поверхностный слой по своим свойствам резко отличается от той жидкости, из которой он образовался. Хаотического теплового движения молекул, характерного для жидкости, в нем нет; он скорее напоминает кристаллическое твердое тело с упорядоченным расположением молекул, и поэтому может быть назван квазикристаллическим. Граничное трение внутри такого слоя можно сравнить с трением при сдвиге листов в стопке бумаги: подобно им слои молекул в граничной масляной пленке, не разрушаясь, сдвигаются относительно друг друга.

Иногда между граничным слоем смазки и поверхностью металла устанавливаются химические связи, образуется тонкий поверхностный слой нового вещества (сульфида, хлорида, мыла и т. д.). Это явление, называемое *хемосорбцией*, обеспечивает еще более прочную связь граничной смазки с поверхностью металла. По существу это переходная форма к окисным и другим поверхностным пленкам, представляющим собой уже не смазочный материал, а химически модифицированный слой основного материала деталей.



Толщина граничного слоя смазки порядка десятых долей микрометра. Ее можно представить так: если с гладкой металлической поверхности, смазанной маслом, насухо масло стереть, то оставшаяся пленка и представляет собой прилипший к металлу граничный слой. Небольшая толщина граничного слоя смазки объясняется тем, что уже на незначительном расстоянии от поверхности металла хаотическое тепловое движение молекул преобладает над силами поверхностного притяжения. Более вязкие масла образуют более толстый граничный слой, так как в них тепловое движение молекул замедлено. Поэтому из масел одинаковой химической природы лучшей смазочной способностью обладают более вязкие масла.

Граничный слой смазки эффективен только при кратковременных и не очень высоких нагрузках. Длительные нагрузки на одних и тех же участках или очень большие, даже непродолжительные нагрузки способны вызвать настолько сильный разогрев его, что хаотическое тепловое движение молекул преодолевает действие поверхностных сил и разрушает упорядоченные слои молекул.

**6.3.3. Оценка смазочной способности.** Прочность пленки смазочного материала как одну из характеристик его смазочной способности принято оценивать величиной максимальной (критической) нагрузки, которую пленка способна выдержать до разрушения. Испытание обычно проводится на четырехшариковой машине трения (рис. 6.4). По результатам серии одномоментных испытаний, проводимых при различной нагрузке, строится диаграмма износа (рис. 6.5) – зависимость диаметра пятна износа (точнее, логарифма средней для опорных шариков величины диаметра пятна износа) от прижимающей силы, действующей со стороны четвертого шарика. Частота вращения четвертого шарика для всех однотипных испытаний одна и та же. Признаком разрушения пленки является резкое усиление изнашивания с повышением нагрузки, характеризующееся точкой излома диаграммы износа. Соответствующая *критическая нагрузка*  $P_{кр}$  позволяет нормировать качество смазочных материалов – смазочных масел и консистентных смазок, помещаемых в чашку с шариками. Величина критической нагрузки для нефтяных дистиллятных масел около 0,3 кН, остаточных масел – 0,5-0,6 кН, синтетических масел 0,9-1,0 кН (см. рис. 6.4). Смазочную способность определяют также и на других машинах трения, предназначенных для испытаний смазочных материалов, по снижению коэффициента трения.

**6.3.4. Трение качения.** Граничная смазка играет существенную роль в обеспечении долговечности подшипников качения – главного типа узла трения современных авиационных двигателей. Сила, прижимающая шарик или ролик к обойме, деформирует их. Создается сопротивление качению: катящееся тело должно деформировать образовавшийся перед ним барьер. Периодическая деформация вызывает усталостный износ, появление микротрещин, соединение их и точечное выкрашивание – так называемый *питтинг*. Граничная масляная пленка, не разрушающаяся при контактных нагрузках, понижает усталостный износ; она деформируется в первую очередь, уменьшая контактные напряжения и деформацию металла. При движении тел качения происходит также их проскальзывание относительно лунки в упруго деформированной поверхности ко-

лец; граничная смазка снижает коэффициент трения скольжения между ними. В некоторых подшипниках качения граничный характер смазки наблюдается и на других участках скольжения шариков и роликов в подшипниках – в зоне контакта с сепараторами, с бортиками беговых дорожек (в скоростных подшипниках качения на этих участках создается гидродинамический смазочный слой).

Общий коэффициент трения при нормальной смазке авиационных подшипников качения порядка 0,001-0,007 (меньшее значение для шариковых, большее для роликовых подшипников).

#### 6.4. ПРОТИВОЗАДИРНОЕ ДЕЙСТВИЕ

**6.4.1. Тяжелые режимы трения.** Сверхкритические нагрузки, при которых граничная смазочная пленка разрушается, могут быть в редукторных и червячных силовых передачах. Предотвращение задира на таких режимах зависит от химических процессов в поверхностном слое металла. Условием трения без задира является положительный градиент прочности, т. е. возрастание прочности в глубину материала трущейся детали. Он обеспечивается, если на поверхности металла создается пленка оксидов и других веществ, которая обладает меньшим сопротивлением сдвигу и легче разрушается при контакте с контртелом, чем нижележащие слои металла. Тогда процессы разрушения не затрагивают нижележащие слои, а износу подвергается только химически модифицированный тонкий поверхностный слой. Но не менее важно, чтобы разрушенные пленки мгновенно восстанавливались. Это происходит при доступе к трущимся поверхностям кислорода, диффундирующего через смазочный слой или растворенного в масле, и содержащихся в самом масле химически активных элементов.

**6.4.2. Противозадирные свойства.** Защита от задира окисными пленками недостаточно надежна. Положительную роль в этом отношении играет примесь соединений серы, естественно содержащихся в масле; они обеспечивают образование сульфидных пленок. Наиболее же эффективным является искусственное введение в масло фосфор-, серо- и хлорорганических соединений, которые при высокой температуре разлагаются и образуют фосфиды, сульфиды и хлориды металлов. Такие присадки (трикрезилфосфат, меркаптобензотиазол, совол и др.) называются *противозадирными*. Быстрота химических процессов на поверхности металла в случае тяжелых режимов трения обеспечивается резким местным нагревом контактирующих микроучастков до тысячи градусов и выше.

Вещества образующиеся на поверхности имеют, как правило, более низкую температуру плавления, чем нижележащие слои металла, и в момент резкого нагрева кратковременно переходят в жидкое состояние. В результате уменьшается сопротивление сдвигу, работа трения и тепловыделение, предотвращается расплавление самого металла, схватывание и задир сопряженных поверхностей трущихся деталей.

Противозадирные качества смазочного материала особенно важны в таких условиях, когда поверхности трения лишены доступа кислорода.

Износ, неизбежный при тяжелых режимах трения, обычно не вызывает ухудшения качества поверхности. Более того, происходит ускоренная ее прира-

ботка, выглаживание (особенно под действием фосфорсодержащих присадок). Для этого в состав смазочных материалов могут также вводиться микрослоистые твердые вещества – дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$ , графит и др.

## 6.5. ИЗНАШИВАНИЕ И ИЗНОС

**6.5.1. Основные понятия.** Процесс разрушения и отделения материала с поверхности тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постоянном изменении размеров и (или) формы тела, называются *изнашиванием*. *Износ* – это результат изнашивания, определяемый в установленных единицах длины, массы или объема.

**6.5.2. Зависимость от наработки.** В узлах трения двигателей физико-химический механизм изнашивания определяется наличием на трущихся поверхностях адсорбированных пленок смазочного материала. Процессы микро-резания, вырывания, пластической деформации сначала приводят к сокращению числа выступов, выходящих за границу пленок, уменьшению шероховатости, замедлению изнашивания. Несколько часов идет приработка (рис. 6.6. участок I). Затем наступает длительный установившийся режим медленного изнашивания (участок II). Адсорбированная поверхностью металла граничная пленка воспринимает часть деформации или разрушается вместо поверхностного слоя трущихся деталей, происходит упругое обтекание большей части микронеровностей (рис. 6.1,б). На поверхности трения образуются химически модифицированные слои материала препятствующих развитию процесса заедания трибосистемы. Нарастание износа в этот период обязано главным образом нестационарным режимам. 50-75% износа происходят при пуске и остановках. При недопустимо большом износе через тысячи часов изнашивания изнашивание прогрессирующе ускоряется (участок III). Катастрофические последствия наступают даже при небольших нагрузках – трибосистема заедает или ломается.

**6.5.3. Зависимость от нагрузки.** Оценка влияния нагрузки на изнашивание и износ проводится, как правило, на четырехшариковой машине трения. Повышение нагрузки выше критической  $P_{кр}$  для одних смазочных материалов приводит к заеданию, а для других – к резкому уменьшению темпа изнашивания при достижении величины нагрузки, соответствующей образованию модифицированного поверхностного слоя материала шариков с меньшим коэффициентом трения. Величина этой нагрузки характеризует *противозадирные свойства* смазочного материала.

## Глава 7

### СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА АВИАЦИОННЫХ ГТД

#### 7.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

**7.1.1. Основное назначение масел ГТД.** Смазочные масла, применяемые в ГТД, служат, прежде всего, для обеспечения надежной работы узлов трения – шариковых и роликовых подшипников, редукторов, приводов агрегатов – в течение установленного ресурса. Масла уменьшают силу трения, снижают износ, предотвращают задиры на тяжелых режимах трения при перегрузках и случайных технологических отклонениях, выносят отделившиеся частицы износа, отводят выделившееся при трении тепло.

Разнообразие условий и режимов работы, материалов, контактирующих с маслом в узлах трения, требуют применения на разных видах ГТД различных по составу и свойствам смазочных масел.

**7.1.2. Дополнительные функции масла ГТД.** Кроме выполнения функций, связанных с трением, масло предохраняет детали узлов трения от коррозии, обеспечивает уплотнение зазоров между деталями от перетекания газов. В некоторых случаях маслом охлаждаются детали двигателей, нагретые горячими газами, например, диски турбин. Масло в двигателях находится под давлением, энергия давления может использоваться для управления некоторыми агрегатами, например, для изменения шага воздушного винта ТВД.

**7.1.3. Классификация масел ГТД по назначению.** Масла ГТД делят на группы исходя из вида двигателя и условий его работы, используя в качестве признака классификации температуру масла на выходе из маслосистемы двигателя. Число отечественных и регулярно применяемых импортных масел ГТД (включая маслосмеси как отдельные сорта) около десяти.

Первая группа – масла ТРД дозвуковых и околозвуковых самолетов, допустимая температура выходящего масла 150<sup>0</sup>С. К ней относят сорта МС-8п, МС-8рк.

Вторая группа – масла ТРД сверхзвуковых самолетов с максимальной допустимой температурой на выходе 200<sup>0</sup>С. К ней относятся сорта ИПМ-10, ВНИИ НП 50-1-4ф, ВНИИ НП 50-1-4у, 36/1-КУА.

Третья группа – масла теплонапряженных ТРД, работоспособные при температуре на выходе выше 200<sup>0</sup>С, к ней относятся масла ПТС-225 и ВТ-301.

Четвертая группа – масла газотурбинных силовых установок вертолетов. Для ГТУ вертолетов всех типов предназначены масла Б-3В и ЛЗ-240.

Пятая группа – масла для турбовинтовых двигателей самолетов. На них используются масло МН-7,5у, а также маслосмеси МС-20+МС-8п.

**7.1.4. Классификация масел ГТД по способам получения и составу.** Масла ГТД делят по признакам исходного сырья и способу производства на две больших группы – *нефтяные* (их также называют *минеральными*), состоящие в основном из высокомолекулярных углеводородов, и *синтетические*, состоящие главным образом из сложных эфиров.

Нефтяные масла вырабатываются из мазута – примерно 50%-ного остатка



после отгона бензиновой, керосиновой и дизельной фракций на ректификационной колонне. Из мазута, нагретого в трубчатой печи до 350-375<sup>0</sup>С, отгоняют в вакуумной ректификационной колонне дистиллятные масляные фракции различной вязкости (*distillates* лат. – стёкший по каплям; жидкость, полученная при перегонке в результате конденсации пара). Дистиллят соответствующей вязкости идет на изготовление *дистиллятных* авиационных масел, например, МС-8 (в марке указана кинематическая вязкость при температуре 50<sup>0</sup>С). Оставшаяся неперегнанная смесь более вязких углеводородов с асфальто-смолистыми веществами – *полугудрон* идет на изготовление *остаточных* авиационных масел, например, МС-20 (в марке указана кинематическая вязкость при 100<sup>0</sup>С). Это масло предназначено для поршневых двигателей, но используется для приготовления маслосмесей, предназначенных для ТВД.

Нефтяные масла, делятся на две группы по способу очистки как дистиллятной, так и остаточной масляных фракций – масла *кислотной* и *селективной* очистки. Путем кислотно-контактной очистки – обработкой крепкой серной кислотой, а затем отбеливающей землей, которая адсорбирует асфальто-смолистые вещества и отбросы сернокислотной очистки – получают авиационные масла МК-8 и МК-22, производство которых в настоящее время прекращено (для некоторых неавиационных масел применяют менее глубокую кислотно-щелочную очистку). Селективная, более глубокая очистка производится при помощи селективных растворителей, одни из которых растворяют только неуглеводородные примеси, содержащиеся в полупродукте, а другие – только масляные углеводороды. После отгона растворителей получают авиационные масла – дистиллятное МС-8 и остаточное МС-20.

Следует отметить, что понятие о вредных и полезных составных частях масла в некоторой мере условно. Склонные к образованию углеродистых отложений смолистые вещества являются носителями смазочной способности масла, а удаляемый путем селективной очистки высоковязкий смолистый экстракт является прекрасным компонентом трансмиссионных масел, работающих в условиях высоких нагрузок при сравнительно низкой температуре. Напротив, "переочистка" (слишком глубокая селективная очистка) масел для двигателей снижает их смазочную способность, усиливает износ узлов трения и повышает опасность задира.

## **7.2. АНТИФРИКЦИОННОЕ ДЕЙСТВИЕ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ГТД**

**7.2.1. Режим смазки узлов трения ГТД.** Мгновенные контактные напряжения в подшипниках ротора достигают 2000-3000 МПа. Они воспринимаются граничной пленкой масла. Оно должно обладать достаточной смазочной способностью, чтобы в течение нескольких микросекунд, которыми измеряется продолжительность контакта тел качения с кольцами в каждой точке, пленка не разрушалась. На участках с меньшей нагрузкой (у буртиков колец и гнезд сепараторов) обычно происходит жидкостное трение. Ввиду больших скоростей которые его обеспечивают, не требуется высокой вязкости масла, а с точки зрения подачи к подшипникам и их охлаждения безусловно, желательно маловязкое масло.

ТВД самолетов имеют редуктор, понижающий частоту вращения при пе-



редаче мощности от вала турбины на воздушный винт в 10-15 раз, а ГТУ вертолетов – в несколько десятков раз. Соответственно возрастает крутящий момент и нагрузки в зацеплении шестерен редуктора. Кроме того, они работают со значительно большей продолжительностью контакта, чем в подшипниках качения. Редуктору нужно более вязкое масло, чем для смазки подшипников, с более высокой смазочной способностью и лучшими противозадирными свойствами. Для ТВД характерна высокая теплоотдача в масло из-за превращения в теплоту мощности трения в редукторе, соответствующей нескольким десяткам киловатт. В связи с необходимостью отвода этого тепла количество и прокачка масла в ТВД в несколько раз больше, чем в ТРД.

**7.2.2. Температурный режим узлов трения ГТД.** Нормальная работа ТРД обеспечивается небольшим количеством масла (10-25 л), циркулирующего в системе 50-130 раз в час, т. е. продолжительность одного цикла 0,5-1 мин. Температура масла из-за разнообразия условий эксплуатации может колебаться в значительных пределах от минус 30-60°C на входе до плюс 150-200°C на выходе и выше. В связи с этим необходима пологая вязкостно-температурная характеристика масла, низкая температура его застывания. Подшипники компрессора при работе нагреваются приблизительно до 120-200°C, подшипник турбины до 250-300°C. Большую роль в поддержании приемлемого температурного режима играет охлаждающее действие циркулирующего масла, низкая вязкость которого способствует интенсивному обтеканию трущихся поверхностей.

После остановки двигателя прекращается циркуляция масла и внешний обдув корпуса подшипников, из-за чего температура подшипника турбины поднимается еще выше. Нагрев масла способствует потере легких фракций нефтяного масла, повышению его вязкости и ухудшению работы узлов трения, приводит к сокращению срока его службы. Синтетические масла практически начинают испаряться при таких температурных условиях, при которых нефтяные масла испаряются почти полностью.

**7.2.3. Противоизносные и противозадирные присадки.** В состав нефтяных масел МС-8п и МС-8рк вводится присадка 1% *трикрезилфосфата*, содержащего фосфор, которая примерно вдвое повышает прочность граничной пленки, обеспечивающей противоизносный эффект. Но наиболее существенным является "лекарственный" эффект этой присадки в случае начала разрушения поверхностей трения из-за незамеченных технологических дефектов, действия непредвиденных эксплуатационных факторов, в том числе превышения допустимых гироскопических моментов при выполнении высшего пилотажа. Образующаяся вследствие местного повышения температуры и разложения трикрезилфосфата низкоплавкая металл-фосфорная эвтектика сглаживает поверхность и предотвращает задир. В первые часы работы двигателя, этот эффект помогает приработке деталей. Концентрация 1% достаточно ядовитого трикрезилфосфата еще не делает масло токсичным. В синтетические масла, и без того токсичные, вводится 3-5% трикрезилфосфата.

В масло Б-3В, предназначенное для ГТУ вертолетов, в качестве еще более эффективной присадки аналогичного действия вводится меркаптобензотиазол (техническое название *каптакс*). Однако из-за недостаточной стабильности

масла Б-3В (см. 7.5.2.) разработано новое масло ЛЗ-240 того же назначения, содержащее трикрезилфосфат.

Еще более эффективная хлорсодержащая присадка *совол*, которая первоначально вводилась в масла ТВД и ГТУ вертолетов, по экологическим причинам запрещена.

### 7.3. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГТД И ТРЕБОВАНИЯ К МАСЛАМ

**7.3.1. Система смазки.** Типичная для современных ГТД система смазки – *циркуляционная незамкнутая*, в которой масло забирается из маслобака и после каждого цикла циркуляции поступает обратно в бак (рис. 7.1). Нагнетающим насосом масло подается через фильтр тонкой очистки по магистралям высокого давления (на рис. 7.1 выделены жирными линиями) к объектам смазки. Главными из них являются подшипники качения опор компрессора и турбины, работающие с частотой вращения порядка 6000-12000 мин<sup>-1</sup>. Масло поступает к подшипникам через трех-четырёхструйные форсунки в зазор между кольцом и сепаратором, интенсивно дробится, покрывает поверхность тел качения, колец и сепараторов, омывает внешнюю поверхность подшипников и вспененное стекает в маслосборники. Оттуда оно засасывается откачивающими насосами. Чтобы в откачивающих магистралях (на рис. 7.1 жирные штриховые линии) не возникла кавитация, в масляных полостях создается небольшое избыточное давление (порядка 10-30 Па.). Сжатый воздух просачивается туда извне через уплотнения масляных полостей, препятствуя тем самым утечке масла.

Откачивающие насосы прогоняют масло через центробежный газоотделитель, в основном разрушающий пену, а затем в маслобак через радиатор, который на сверхзвуковых самолетах охлаждается топливом, а на дозвуковых – воздухом. Маслобак и все масляные полости, куда попадает воздух, в том числе полость центробежного газоотделителя, соединены магистралями суфлирования (на рис. 7.1 светлые линии) с центробежным суфлером и через него имеют выход в атмосферу. Суфлер отделяет взвешенное в воздухе масло и возвращает его в маслосистему.

Данные по прокачке масла и температурным условиям в различных участках системы смазки приведены на рис. 7.1.

Кроме смазки подшипников ротора масло обеспечивает смазку шестеренчатых передач приводов агрегатов, работающих при невысоких нагрузках. К некоторым из них масло подается также струйными форсунками, остальные смазываются образующимся в коробке приводов масляным туманом.

**7.3.2. Воздействие масла на систему смазки.** Масло при работе ГТД соприкасается с каталитически активными медными сплавами (бронзовые или латунные сепараторы подшипников), с коррозионно-нестойкими свинцовыми и другими покрытиями, с частично растворимыми или набухающими уплотнительными материалами (резина, паронит). Чем масло нейтральней по отношению к ним, тем больше срок службы и двигателя, и самого масла. Масло не имеет непосредственного контакта с продуктами сгорания топлива и с жидким топливом (разумеется, при исправном состоянии топливно-масляных радиаторов и уплотнений привода топливных насосов).

Свойства масла, которые могут влиять на эксплуатационную надежность

ТРД, сгруппированы на рис. 7.1 по узлам, в которых проявляется это влияние. Указаны зависящие от свойств масла процессы и явления, связанные с ними особенности эксплуатации и возможные опасные последствия неудовлетворительного качества масла.

**7.3.3. Влияние редуктора.** Турбовинтовые двигатели самолетов имеют редуктор, понижающий число оборотов при передаче мощности от вала турбины на воздушный винт в 10-15 раз, а силовые установки в несколько десятков раз. Соответственно возрастает крутящий момент и нагрузки в зацеплении шестерен редуктора. Кроме того, они работают со значительно большей продолжительностью контакта, чем в подшипниках качения. Поэтому редуктору нужно более вязкое масло, чем для смазки подшипников ротора, с более высокой смазочной способностью и лучшими противозадирными свойствами. Для редуктора характерна высокая теплоотдача в масло из-за превращения в теплоту мощности трения.

В связи с необходимостью отвода этого тепла количество и прокачка масла в ТВД и ГТУ вертолетов больше, чем в ТРД.

**7.3.4. Требования к свойствам масел.** Исходя из задачи обеспечения работоспособности двигателя в течение установленного срока службы желательны следующие свойства масел:

- хорошая смазочная способность;
- возможно меньшая вязкость, но достаточная для создания надежного жидкостного слоя в узлах с гидродинамической смазкой при максимальной рабочей температуре (не ниже заданной величины при температуре 50 и 100<sup>0</sup>С);
- пологая вязкостно-температурная характеристика;
- резкое, возрастание вязкости с повышением давления;
- противозадирные свойства при высоких нагрузках;
- отсутствие нестабильных составных частей, выделяющихся в виде загрязняющих отложений;
- отсутствие или безопасное количество коррозионноактивных веществ и составных частей, склонных к превращениям в коррозионноактивные вещества;
- низкая температура застывания;
- высокая температура вспышки характеризующая стойкость против испарения;
- физическая однородность: отсутствие механических примесей, воды, пенообразования;
- минимальная гигроскопичность;
- радиационная стойкость.

Во избежание отравления и других поражений личного состава желательно, чтобы масло было нетоксичным. Одно из существенных требований к маслам, потребляемым в большом количестве, – наличие сырьевой и производственной базы и невысокая стоимость производства.

**7.3.5. О реализации требований.** Масло, обладающие всем комплексом желательных свойств, получить практически невозможно, так как многие требования, предъявляемые к ним, противоречат друг другу. Подбор свойств сма-

зочных масел еще в большей степени является компромиссным, чем подбор свойств топлив. Так, ароматические углеводороды обеспечивают высокую термоокислительную стабильность нефтяных масел, но ухудшают вязкостно-температурную характеристику и повышают агрессивность к резине, Парафиновые углеводороды с пологой вязкостно-температурной характеристикой имеют высокую температуру застывания. Естественные носители смазочной способности (органические кислоты, смолы, соединения серы) ухудшают термостабильность и повышают коррозионную активность в отношении металлов. Синтетические масла, обладающие рядом ценных качеств, коррозионноактивны и ядовиты. В связи с этим к каждому сорту масла предъявляются высокие требования по тем показателям, которые являются решающими, а по остальным устанавливаются менее жесткие требования.

Нормы вязкости масел устанавливаются при температуре, более или менее соответствующей условиям их применения, чаще всего 100<sup>0</sup>С или 50<sup>0</sup>С.

Однако узлы трения не слишком чувствительны к вязкости смазочных материалов ввиду ее *саморегулирования* в широком диапазоне изменения эксплуатационных факторов. Когда вязкость слишком высока (например, из-за низкой температуры масла), то велика и работа трения. Она переходит в тепло, масло нагревается, и вязкость его понижается. Тот же эффект наблюдается при увеличении частоты вращения. Он полезен потому, что снижает сопротивление на высоких оборотах, когда гидродинамический режим смазки обеспечивается меньшей вязкостью.

Некоторые свойства масла при его повседневном применении контролировать сложно (например, смазочную способность, стабильность, коррозионные свойства). Для суждения об этих свойствах пользуются косвенными признаками – значениями плотности, зольности, коксуемости, кислотного числа, температуры вспышки и др. Если по всему комплексу этих показателей масло находится в пределах норм, т.е. соответствует образцу, успешно прошедшему официальные испытания (по данным которого установлены нормы), считается, что масло соответствует ему по химическому составу и, следовательно, по смазочной способности, по стабильности и коррозионным свойствам.

#### 7.4. СТАНДАРТНЫЕ СОРТА МАСЕЛ ТРД

**7.4.1. Техническая политика в области сортамента.** Применявшиеся на ТРД первого-второго поколений нефтяные масла без присадок – трансформаторное, МК-8, МК-6, МС-6 – не обеспечивали возможности повышения тактико-технических показателей ТРД из-за низкой термоокислительной стабильности, быстрого испарения легких фракций с ухудшением запуска и обусловленной этим необходимостью частой замены масла. Кроме того, сырьевые ресурсы для производства этих масел, а также несколько лучшего масла с присадкой МК-8п были ограниченными (их получали в основном из бакинских и других прикаспийских нефтей).

Поэтому в качестве основного сорта масла ТРД с температурой на выходе маслосистемы не выше 150<sup>0</sup>С было определено нефтяное масло МС-8п с комплексом присадок, которое по термоокислительной стабильности, низкотемпературным свойствам и сроку службы значительно лучше прежних сортов и



обеспечено сырьевой и производственной базой. В настоящее время это наиболее массовое масло. На его базе разработан новый сорт масла МС-8рк – рабоче-консервационное, которое при сохранении эксплуатационных показателей масла МС-8п позволяет сохранять двигатели на консервации в течение 4-8 лет (в 8 раз дольше, чем МС-8п). Однако производство масла МС-8рк, начатое с применением присадки, поставлявшейся с Украины, пришлось прекратить. Предполагается его возобновление после освоения производства этой присадки на одном из химических заводов России.

В предвидении разработки термонапряженных ТРД с более высокой температурой масла еще до создания таких двигателей были разработаны синтетические масла – полиэфирное 36/1, диэфирное ВНИИНП-50, работоспособные до температуры 175<sup>0</sup>С, и даже кремнийорганическое фторированное ВТ-301 для перспективных ТРД с температурой масла на выходе маслосистемы 280<sup>0</sup>С. После появления двигателей, использовавших масла ВНИИНП-50 и 36/1, существенно доработан входящий в их состав комплекс присадок, освоено их производство и применение.

Но высокая стоимость этих синтетических масел заставила обратиться к другому варианту синтеза масел – из углеводородов. Изопарафиновое масло ИПМ-10 оказалось значительно дешевле, неагрессивным к прокладочным материалам, менее токсичным. Оно нашло широкое применение, как единое унифицированное. Предполагалась замена этим маслом сортов 36/1 КУА и ВНИИНП 50-1-4ф. Но с 1993 г. производство масла ИПМ-10 из-за отсутствия изопарафиновой основы прекращено (вышла из строя установка, на которой ее получали). Временной мерой обеспечения эксплуатации авиационной техники, на которой предусмотрено применение масла ИПМ-10, является допуск к использованию зарубежных аналогов. Близким по природе и качеству к маслу ИПМ-10 являются масло TurboNicoil-210А производства французской фирмы Nico и масло Mobil Turbo319A-8 производства американской фирмы Mobil Oil.

Производство углеводородного масла ИПМ-10 возобновлено на синтетической основе: альфа-олефинов (непредельных углеводородов, молекула которых содержит двойную связь около крайнего атома углерода) получают полиальфаолефиновое масло (ПАОМ), состоящее из изопарафиновых углеводородов. Оно допущено к применению на авиационной технике.

**7.4.2. Сорта нефтяных масел ТРД.** Масло МС-8п практически стало основным сортом после прекращения выработки масла МК-8п. Его основа обеспечивает лучшие эксплуатационные свойства по сравнению с МК-8п, – меньше потери от испарения, стабильнее вязкость благодаря отсутствию легких фракций (его температура вспышки в закрытом тигле на 15<sup>0</sup>С выше), лучше пусковые свойства (в 1,6 раза ниже вязкость при температуре –40<sup>0</sup>С). Содержит присадки: 0,6% ионола – дибутилкрезола (C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>ОН и неозон – фенил-α-нафтиламин, которые тормозят окислительные процессы, противоизносную трикрезилфосфат (1%), пассиватор коррозии меди БТА – бензотриазол.

Масло МС-8рк рабоче-консервационное на базе МС-8с с добавкой антикоррозионной присадки СИМ (алкилсукцинимид мочевины). После освоения производства этой присадки срок длительного хранения двигателей будет увеличен в 8 раз.



**7.4.3. Сорты синтетических масел ТРД.** Углеводородное синтетическое масло *ИПМ-10* (изопарафиновое масло с вязкостью  $10 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $50^\circ\text{C}$ ) представляет собой смесь изопарафиновой основы и 9% диоктилсебагината с комплексом присадок: антиокислительной (неозон и ионол), противоизносной (трикрезилфосфат), антикоррозионной (бензотриазол) и др. Стандартом установлена вязкость этого масла при 100% не менее  $3,0 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Имеет отличную вязкостно-температурную характеристику. Температура вспышки несколько ниже, чем у других синтетических масел – не менее  $190^\circ\text{C}$ . Менее токсично. Внедрение этого масла в качестве единого унифицированного задержалось из-за вынужденного прекращения производства.

*Диэфирное масло ВНИИНП 50-1-4ф и ВНИИНП 50-1-4у (улучшенное)* представляют собой сложный эфир диоктисебагинат с комплексом присадок: антиокислительной неозон и противоизносной трикрезилфосфат в обоих сортах, а во втором из них весьма эффективной присадки ДАТ (диизоакрилфениламин), обеспечивающей ему лучшую окислительную стабильность, и антикоррозионной (деактиватора металла) БТА. Оба масла по токсичности, коррозионной активности, сроку хранения уступают маслу ИПМ-10.

*Масло 36/1 КУА* – синтетическое полиэфирное масло, состоящее из пентаэритритового эфира и диэтиленгликолевого эфира с присадками: противозадирной каптакс (меркаптобензотиазол) и антиокислительной параоксидифениламин. Работоспособно до более высокой температуры, чем масла ИПМ-10 и оба сорта ВНИИНП 50-1-4ф(у) – до  $200^\circ\text{C}$ . Токсично, коррозионноактивно, разрушающе действует на многие неметаллические материалы.

Комбинированное *масло ПТС-225* – синтетическое масло для теплонапряженных двигателей, работоспособное до  $225^\circ\text{C}$ . Основа масла состоит из двух компонентов – пентаэритритового эфира и кремнийорганической жидкости ПЭС-7. Производство его сложно и дорого.

Кремнийорганическое *масло ВТ-301* – синтетическое масло на основе фторированной кремнийорганической жидкости с железосодержащей присадкой. Обладает наиболее высокой термоокислительной стабильностью (до  $280^\circ\text{C}$ ), наименьшей летучестью, наилучшей вязкостно-температурной характеристикой из всех масел. Очень высокая термостабильность объясняется тем, что фтор присоединен к "слабым" точкам молекул, которые при сильном нагреве поддались бы атаке кислорода. Предполагалось его применение на ТРД без теплообменника в маслосистеме, но такого двигателя до настоящего времени нет. Весьма дорогое в производстве и недостаточно изученное в эксплуатации.

**7.4.4. Сорты зарубежных масел ТРД.** Маловязкие нефтяные масла для ТРД марки 1010, соответствующие американской военной спецификации MIL-0-6981C и канадской спецификации 3-GP-901a и английское Turbo Oil-2 (код 0-133 номенклатуры НАТО) имеют вязкость около  $2,5 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $100^\circ\text{C}$  и по большинству показателей качества близки к маслу МС-8п. Они могут быть использованы в качестве его заменителя. Менее вязкое американское масло марки 1005, соответствующее той же военной спецификации (цифровая маркировка американских нефтяных масел производится прибавлением к числу 1000 значения вязкости в  $\text{мм}^2/\text{с}$  при  $103^\circ\text{F}$ , то есть  $37,8^\circ\text{C}$ ), а также равноценное

ему английское масло Turbo Oil-1 (код 0-132 по номенклатуре НАТО) можно применять только в зимнее время года. Напротив, более вязкое английское масло OM-11 (спецификация DEPД-2490) или Turbo Oil-3 с вязкостью около 3,5 мм<sup>2</sup>/с при 100°С, которое также можно отнести к этой группе масел и применять взамен сорта МС-8п непригодно для российских ТРД зимой при температуре наружного воздуха у земли ниже –10°С (температура застывания этого масла не выше –46°С).

В США и западноевропейских странах также применяют *диэфирные* (на основе диизооктилсебагината) и *полиэфирные* маловязкие масла для ТРД. Температурный предел их применения 175-180°С, кратковременно до 240°С. Вязкость этих масел около 3,0-3,5 мм<sup>2</sup>/с при 100°С, температура застывания не выше –60°С, температура вспышки не ниже 204°С, содержание различных присадок (противоизносной, антиокислительной, антипенной) около 5%. К этой группе относятся английское масло Turbo Oil-300 или Aero Shell-300, ранее именовавшееся Turbo Oil-15 (цифровое обозначение синтетических масел фирмы Shell соответствует умноженной на 100 вязкости в мм<sup>2</sup>/с при температуре 210°F, то есть 98,9°С); американское масло по военной спецификации MIL-L-7838G; французское по спецификации Air-3513 и др. Они могут применяться взамен отечественных сортов ВНИИНИ 50-1-4ф и 36/1 КУА при условии совместимости с ними.

## 7.5. СТАНДАРТНЫЕ СОРТА МАСЕЛ ГТУ ВЕРТОЛЕТОВ

**7.5.1. Подход к выбору масла.** В силовой установке вертолетов эксплуатация которых зачастую происходит вне аэродромов в различных климатических и погодных условиях и отличается разнообразием оперативных задач, применяется синтетическое масло, позволяющее обеспечить постоянную готовность к вылету с минимальной затратой сил и времени на обслуживание системы смазки. Единое масло для ротора двигателя и главного редуктора, в котором рабочая температура ниже, чем в редукторе ТВД, должно быть по вязкостным свойствам промежуточным между синтетическими маслами ТРД и ТВД, а по уровню противоизносных и противозадирных свойств – близким к маслам ТВД.

**7.5.2. Масло Б-3В.** Представляет собой пентаэритритовый эфир с присадками: противозадирной каптакс и антиокислительной параоксидифениламин (оно сходно с маслом 36/1 КУА, но не содержит маловязкого компонента). Вязкость масла Б-3В не менее 5,0 при 100°С, оно имеет высокие смазочные и противозадирные свойства. Существенный недостаток этого масла – вследствие окисления присадки каптакс при высокой температуре образуется ее другая форма альтакс, которая при низкой температуре выпадает в осадок. Осадок трудно обнаружить, потому что при прогреве он растворяется.

**7.5.3. Масло ЛЗ-240.** Разработано для замены масла Б-3В в связи с нестабильностью присадки каптакс. В ту же полиэфирную основу вместо него введены другие присадки противоизносного и противозадирного действия: трикрезилфосфат (3%) и совол (2%), содержащий 40% хлора, а также антиокислительную присадку неозон (1%) и деактиватор металла БТА (0,1%). Большая часть свойств этого масла близка к свойствам масла Б-3В. Однако вопрос о переходе на масло ЛЗ-240 вместо Б-3В остается открытым, так как по экологическим соображениям прекращено производство присадки совол.

**7.5.4. Зарубежные масла.** Используемые в силовых установках вертолетов синтетические масла по вязкостно-температурной характеристике и большинству других показателей существенно не отличаются от масла Б-3В. Предназначенные для военных вертолетов должны соответствовать нормам американской спецификации MIL-L-23699В.

## **7.6. СТАНДАРТНЫЕ СОРТА МАСЕЛ ТВД САМОЛЕТОВ**

**7.6.1. Проблемы состава масел.** Требования к смазочному маслу, связанные с конструкцией и рабочим режимом высоконагруженного редуктора и подшипников ротора ТВД совершенно различны. Редуктору нужно масло с высокой смазочной способностью и эффективным действием. Вязкость его должны быть достаточно высокой, чтобы на шестернях при большой скорости вращения удерживался непрерывный масляный слой. Подшипника ротора ТВД, напротив, нужно такое же маловязкое масло, как подшипника ротора ТРД.

Первоначально для смазки ТВД была взята смесь нефтяных масел – маловязкого дистиллятного МК-8, как носителя качеств, необходимых для смазки подшипников ротора, и высоковязкого остаточного масла МК-22, которое зарекомендовало себя в редукторе мощных авиационных поршневых двигателей (в дальнейшем из-за изменения ассортимента вырабатываемых масел для составления смесей использовались сходные с ними масла других марок). Для различных ТВД (двух типов) и разных сезонных условий установлены три соотношения масел в смеси с 75:25, 25:75, 50:50. Маслосмесь в основном обеспечила нормальную работу ТВД, но ее эксплуатационные свойства оказались не вполне удовлетворительными. За несколько десятков часов работы ТВД вследствие испарения легких фракций масла МК-8 существенно возростала низкотемпературная вязкость, что затрудняло пуск ТВД и увеличивало продолжительность прогрева. Недостаточная термостабильность тяжелых остаточных фракций вызывала интенсивное лакообразование. Эксплуатация вертолета на маслосмесях усложняется необходимостью частого их долива и замены, заботой о качественном приготовлении маслосмесей непосредственно на складе ГСМ авиатехнических частей, обслуживающих полеты.

Задача разработки единого масла ТВД решалась по двум направлениям. Первое направление – разработка синтетического масла. По образцу английского синтетического масла Turbo Oil-750 было сделано масло ВНИИНП-7. Его диэфирная основа, такая же, как у масла ВНИИНП 50-1-4ф, предназначенного для ТРД, загущена углеводородным полимером до вязкости 7,5-8 мм<sup>2</sup>/с; концентрация противоизносной и противозадирной присадки увеличена. По сравнению с нефтяными маслами масло ВНИИНП-7 сильнее действует на некоторые неметаллические материалы, краски, элементы внешней обвязки двигателя. Токсично. Под действием влаги его основа подвергается гидролизу. Концентрация вязкостной присадки при длительной работе уменьшается из-за "размола". После нескольких лет применения производство этого масла прекращено в связи с меньшей стоимостью и другими преимуществами разработки второго направления – получение масла на нефтяной основе.

**7.6.2. Масло нефтяное МН-7,5у.** Заменяет все типы маслосмесей на основе нефтяных масел. Его вязкость при температуре 100<sup>0</sup>С не менее 7,5мм<sup>2</sup>/с.

Представляет собой базовое нефтяное маловязкое масло (близкое к МС-8), загущенное высокомолекулярными полимерами. Таким способом получена требуемая вязкость при основной рабочей температуре с сохранением пологости вязкостно-температурной характеристики, свойственной маловязкому маслу. Крупные малоподвижные молекулы полимера, которые в сотни и тысячи раз больше молекул жидкой основы, тормозят ее течение, увеличивают внутреннее трение между слоями масла, повышая уровень вязкости в широком диапазоне температур. При этом зависимость вязкости от температуры (ее "крутизна" при понижении температуры) остается примерно той же, как для маловязкой основы, (рис. 7.3), что обеспечивает маслу хорошие пусковые свойства.

Кроме вязкостной присадки масло МН-7,5у содержит композицию присадок противоизносного и противозадирного действия (трикрезилфосфат и др.), антиокислитель и деактиватор металла, всего более 15% от массы масла. Поэтому его иногда называют полусинтетическим. Первоначально применялось менее стабильное масло МН-7,5 с основой меньшей вязкости и большим количеством вязкостной присадки.

Масло МН-7,5у предназначено для ТВД всех типов с рабочей температурой масла до 170<sup>0</sup>С. Минимальная его температура, позволяющая запускать двигатель без подогрева, минус 35<sup>0</sup>С. Разработано масло МН-7,5рк (рабоче-консервационное), в которое введена антикоррозионная присадка СИМ (алкенилсукцинимид мочевины). Масло обеспечивает надежную консервацию топливных и масляных систем ТВД в течение нескольких лет и возможность пускать двигатель в эксплуатацию без расконсервации.

**7.6.3. Маслосмеси.** В качестве дублирующих и резервных марок допускается применять для ТВД смеси масел МС-8П и МС-20. Для смазки широко используемых двигателей типа АИ-20 и других средней мощности применяют маслосмесь СМ-4,5 (75% МС-8П + 25% МС-20), вязкость которой установлена в пределах 4,3-4,7 мм<sup>2</sup>/с при температуре 100<sup>0</sup>С. Норма на ее температуру застывания не выше -35<sup>0</sup>С.

Для ТВД высокой мощности предназначена маслосмесь СМ-11,5 (25%МС-8п + 75% МС-20) с пределами вязкости 9,5-13,5 мм<sup>2</sup>/с при 100<sup>0</sup>С и температурой застывания -20<sup>0</sup>С. При низких температурах воздуха на этих двигателях применяют маслосмесь СМ-8 с пределами вязкости 7-9 мм<sup>2</sup>/с при 100<sup>0</sup>С и температурой застывания -30<sup>0</sup>С.

## **7.7. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ГТД**

**7.7.1. Углеводородные масла.** Температура узлов трения ТРД самолетов недалекого будущего с числом  $M = 3$  предполагается порядка 300-400° С, а при  $M = 3,5-4$ , по-видимому, достигнет 450-600° С, что потребует существенного повышения термостойкости масел.

Исследования показывают возможность получения из недефицитного и дешевого нефтяного сырья таких масел, которые пригодны для узлов трения с температурой 300-350°С и превосходят по термоокислительной и термической стабильности синтетические масла типа сложных эфиров. Способы их получения – глубокая очистка и гидрогенизация узких нефтяных фракций, а также химическая переработка непредельных и ароматических углеводородов, получае-



мых из нефтяного сырья в процессе производства топлив, и обязательное введение комплекса присадок. Потеря носителей смазочной способности в результате глубокой очистки не играет роли при введении в масло эффективных противоизносных присадок. Состав масла должен быть подобран так, чтобы оно обладало высокой "приемистостью" к антиокислительным присадкам.

**7.7.2. Фтор- и хлорфторсодержащие масла.** Из синтетических масел наиболее стойки в условиях высокой температуры считаются *фторуглеродные* масла. Они принципиально не способны окисляться, потому что фтор, будучи сильнейшим окислителем, образует более прочную связь с углеродом молекул, чем кислород. Они не горючи и химически не активны – не вызывают коррозии, не боятся воздействия агрессивных компонентов, не ядовиты. Фторуглеродные масла исключительно термостойки, они не образуют осадков до 450-500°C. Смазочная способность их хорошая. Существенным недостатком этих масел является очень крутая вязкостно-температурная характеристика. Из-за этого фторуглеродное масло, подобранное для работы при высокой температуре, может оказаться непригодным не только при низкой, но и при умеренной температуре. Это масло – "однотемпературное".

Несколько лучшую вязкостно-температурную характеристику, но меньшую термостойкость имеют *хлорфторуглеродные* масла. Они стабильны только до 300-360°C, но при разложении в условиях более высокой температуры не дают углеродистого осадка. Смазочная способность их очень хорошая, коррозионная активность по отношению к большинству металлов (кроме меди) ничтожна. Важным качеством этих масел является стойкость по отношению к высокоагрессивным компонентам ракетного топлива и к жидкому кислороду, невоспламеняемость, что позволяет их применять также для смазки турбонасосных агрегатов ЖРД. При попадании на кожу эти масла оказывают раздражающее воздействие.

Очень хорошую вязкостно-температурную характеристику в сочетании с термостабильностью имеют кремнийорганические масла, но они обладают плохой смазочной способностью. В качестве высокотемпературных масел предполагается возможным использование приготовленных на их основе гибридных соединений – кремнийорганических фторэфиров, сочетающих главное достоинство кремнийорганических жидкостей (пологую вязкостно-температурную характеристику) и термоокислительную стабильность фторуглеродных соединений.

**7.7.3. Расплавы металлов и стекла.** Рост рабочих температур узлов трения ГТД в дальнейшем, вероятно, будет продолжаться, в результате чего окажутся непригодными даже самые термостойкие органические и элементоорганические жидкости. Принципиально возможные типы смазки в этих условиях – это расплавы металлов и стекла, твердые (сухие) смазочные материалы и газы.

Жидкие металлы обладают важными для смазочных материалов качествами – очень высокой теплопроводностью, облегчающей отвод тепла от трущихся поверхностей, весьма пологой вязкостно-температурной характеристикой, широким температурным диапазоном жидкого состояния. Главные трудности, мешающие их применению, – окисление воздухом с образованием твердых окислов (порошков, пленок) и высокая температура кристаллизации. Жидкая при обычной температуре ртуть непригодна, потому



что она кипит при слишком низкой температуре ( $367^{\circ}\text{C}$  при атмосферном давлении). При условии предварительного подогрева могут быть использованы низкоплавкие, стойкие к окислению *галлий*, *индий* и их сплавы. Температура плавления галлия  $30^{\circ}\text{C}$ , причем он склонен к переохлаждению. Индий плавится при  $155^{\circ}\text{C}$ ; при обычной температуре это мягкий металл (несмотря на высокую его плотность –  $7300\text{ кг/м}^3$ ). Его давно применяют в качестве антифрикционного покрытия в авиационных подшипниках. И галлий и индий не испаряются до очень высоких температур (температура кипения индия  $1450^{\circ}\text{C}$ , галлия  $2070^{\circ}\text{C}$ ).

Идеально стойким к окислению жидким смазочным материалом может быть расплавленное *стекло*, так как оно является смесью окислов кремния  $\text{SiO}_2$ , бора  $\text{B}_2\text{O}_3$  и металлов. Изыскиваются относительно низкоплавкие композиции, обладающие в жидком виде необходимой смазочной способностью.

## **7.8. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ, КОТОРЫЕ ОГРАНИЧИВАЮТ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК**

**7.8.1. Пусковые свойства.** Минимальная температура масла, до которой возможен запуск двигателя, определяется двумя факторами, связанными с увеличением вязкости масла при понижении температуры: ростом сопротивления раскрутке двигателя от стартера и уменьшением или прекращением подачи масла к узлам трения.

Главная часть момента сопротивления вращению при раскрутке двигателя на нехолодном масле обусловлена работой сжатия воздуха; доля трения в подшипниках и приводе маслоагрегатов составляет 3-5%. Однако при понижении температуры она становится соизмеримой с затратой на сжатие воздуха. В результате увеличивается продолжительность и уменьшается надежность запуска или он вообще становится невозможным, если мощности стартера не хватает для преодоления возросшего сопротивления раскрутки ротора. Максимальной вязкостью масла, до которой возможен запуск от стартера, в зависимости от типа двигателя обычно считается  $2000\text{--}5000\text{ мм}^2/\text{с}$  более точное ее значение зависит от конструкции двигателя и мощности стартера. Соответствующая этой вязкости температура может быть определена для каждого масла по его вязкостно-температурной характеристике.

Прекращение циркуляции масла в системе происходит при вязкости порядка  $20000\text{ мм}^2/\text{с}$ . Заметное уменьшение подачи масла к ответственным узлам трения авиационных двигателей, а также существенное ухудшение разбрызгивания и распределения масла внутри узлов трения обычно происходят при достижении вязкости порядка  $5000\text{ мм}^2/\text{с}$  – не намного большей, чем предельная вязкость раскрутки ротора. Поэтому значительное увеличение мощности стартера не может рассматриваться как средство преодоления плохих пусковых свойств масла: результатом его может быть выход из строя узлов трения. На двигателях, ротор которых соединяется с турбостартером с помощью гидромуфты при вязкости в несколько тысяч  $\text{мм}^2/\text{с}$  ухудшается заполнение гидромуфты маслом, что приводит к малой раскрутке ротора.

Для масел одинаковой химической природы справедливо правило: *чем ниже вязкость, тем меньше она возрастает с понижением температуры*, т.е. лучше пусковые свойства масла. Однако снижение вязкости масел как средство

улучшения вязкостно-температурной характеристики обычно неприемлемо из-за необходимости иметь достаточную вязкость при максимальной рабочей температуре. Хорошие вязкостно-температурные свойства присущи синтетическим маслам. Удовлетворительно работают при низких температурах загущенные до соответствующей вязкости маловязкие нефтяные масла, например, масло МН-7,5у.

**7.8.2. Испаряемость.** От испаряемости масел при работе двигателя зависит их расход. Расход синтетических масел благодаря их низкой испаряемости в несколько раз меньше, чем нефтяных. Испарение дизфирного и полиэфирного масел в тонком слое практически начинается при такой температуре, при которой нефтяные масла, близкие им по вязкости в рабочем диапазоне температур, испаряются почти полностью.

Испарение масел в условиях применения вызывает необратимые изменения их состава и свойств. Наиболее простой характеристикой наличия в масле легко испаряющихся фракций является температура вспышки. Она определяется в открытом тигле или в специальном приборе с закрытым тиглем, ограничивающем рассеивание паров (при этом она ниже, чем в открытом).

Более полную оценку испаряемости масел дает фракционная разгонка, но проводить ее таким способом, как для топлив, нельзя: температура кипения масляных фракций при атмосферном давлении выше температуры термического разложения некоторых веществ, входящих в состав масел. Поэтому фракционный состав масел определяют на вакуумной установке, обеспечивающей необходимое понижение температуры кипения. Другой метод основан на испарении масла при атмосферном давлении из тонкого слоя – плоскодонных алюминиевых чашечек (при подъеме температуры на каждые 20°С снимают и взвешивают по одной чашечке). Таким образом можно выявить различие фракционного состава масел, не интересуясь действительной температурой кипения их фракций.

**7.8.3. Сохранение физических свойств.** Чем более узок фракционный состав масла, тем меньше меняются его свойства в результате испарения, тем масло физически более стабильно. Пределом является масло, выкипающее при одной постоянной температуре, свойства которого при испарении вообще не изменяются. У масел широкого фракционного состава после испарения легких фракций увеличивается доля тяжелых, вязких составных частей. Это резко проявляется в затруднении холодного запуска двигателя.

**7.8.4. Механические примеси и вода.** Физическая однородность масел, так же как и топлив, определяется отсутствием в них механических примесей и капельно-жидкой воды. Механические примеси в масле обнаруживаются на глаз при осмотре капли, нанесенной на выпуклое стекло, или на выпуклое стекло, или в порции масла, смешанной с 4 порциями бензина-растворителя в стеклянной посуде. При необходимости осмотр пленки масла производится через лупу или с помощью микроскопа. Качественная проверка отсутствия воды в масле производится путем подогрева масла в пробирке до температуры 150°С. Жидкая вода, переходя в парообразное состояние, обнаруживает себя по вспениванию масла и характерному потрескиванию. Аналогично определяется отсутствие жидкой воды и в консистентных смазках, которые в процессе определения расплавляются.

Появление в масле взвешенной массы мельчайших механических приме-

сей или водной эмульсии повышает вязкость масла. Но главный ущерб от физической неоднородности состоит в нарушении непрерывности граничной смазки, абразивном и коррозионном действиях включений, а также иницирующем влиянии их на осадкообразование.

**7.8.5. Термоокислительная стабильность.** При нагреве, обусловленном внешним теплоподводом и трением, в маслах и консистентных смазках идут химические процессы – окисление и разложение. Они приводят к образованию твердых и мазеобразных отложений, загрязняющих двигатель или смазываемый механизм, к повышению вязкости масел, усилению коррозионной активности. Окисление в основном происходит при температурах до 300°C в условиях контакта с кислородом воздуха или другими окислительными агентами и с каталитически активными металлами, прежде всего с медью и медными сплавами. Стойкость смазочного материала к окислению при повышенных температурах называют *термоокислительной стабильностью*. При более высоких температурах (300-400°C и выше) превалируют процессы разложения – распада молекул, отщепления водорода и т. п. Стойкость смазочного материала к разложению при высоких температурах называют *термической стабильностью*.

Глубокое окисление масла идет как в объеме, так и в тонком слое на горячих деталях. Неглубокому, но существенному для дальнейших процессов окислению подвергается масляный туман в полостях двигателя. В объеме окисление происходит внутри маслобака, маслоборников и магистралей при наличии воздуха (растворенного, пробулькивающего или пены). В результате окисления образуются высокомолекулярные органические кислоты и спирты, фенолы, смолы и твердые продукты их конденсации, плохо растворимые в масле. Они выделяются в виде темного порошкообразного осадка или частиц размером 1-2 мм, которые забивают фильтры, жиклеры, масляные форсунки. Иногда в маслобаке образуются крупные куски смолы, внешне напоминающие канифоль. Интенсивное осадкообразование у нефтяных масел начинается при 120-150°C, синтетических – при более высокой температуре 170-200°C. О термоокислительной стабильности масла при его анализе судят по количеству (в %) осадка и по кислотному числу после окисления, а также по увеличению вязкости масла после испытания при 120°C или 175°C или 200°C и выше продувкой воздуха или кислорода при контакте с медью и сталью.

На горячих поверхностях подшипников, поршней и других деталях легкие фракции масла испаряются. Оставшиеся тяжелые фракции превращаются сначала в смолообразные, а затем в твердые лакоподобные или абразивные отложения, которые состоят в основном из углерода. Лакообразование идет непрерывно, интенсивность его увеличивается с ростом температуры. Лак ухудшает теплообмен, изменяет рабочие зазоры в узлах трения.

При анализе масел оценку термоокислительной стабильности в тонком слое производят различными методами: по лакообразованию в пленке, стекающей по наклоненной горячей пластинке, в алюминиевых чашечках в специальном подогревателе (лакообразователе) и др. Особый интерес представляет испытание на установке с высокооборотным подшипником качения, который создает естественную для двигателя схему контакта масла с кислородом и по-

верхностью металла, а также температурные вспышки и электрические явления, инициирующие окисление.

В составе нефтяных масел наиболее стойки к окислению малоразветвленные ароматические углеводороды. Более того, они защищают остальную часть масла. Это объясняется образованием таких фенольных соединений, которые являются *антиокислителями* и обрывают цепи окислительных реакций. В связи с этим слишком глубокая очистка нефтяного масла, при которой удаляются полезные ароматические углеводороды, понижает стабильность масла. Еще больший антиокислительный эффект оказывают искусственно вводимые в масло присадки фенольного характера, например, ионол.

Синтетические масла отличаются более высокой термоокислительной стабильностью, чем нефтяные. Это является главной причиной широкого применения синтетических масел в авиации.

**7.8.6. Термическая стабильность.** По стойкости к разложению при высокой температуре нефтяные масла ТРД, если они защищены от окисления, не уступают синтетическим (более стойки только фторуглеродные). Однако при 400°C и выше все современные жидкие смазочные материалы органического происхождения разлагаются. Нефтяные масла при этом превращаются в углистую нагароподобную массу. Некоторые синтетические масла, приготовленные на основе сложных эфиров, имеют то преимущество, что их продукты разложения летучи или полностью растворимы в масле, т. е. не опасны для двигателя.

Термостабильность некоторых масел контролируется по коксуемости – углистому остатку (в %) после выпаривания и прокаливании масла в приборе с ограничением доступа воздуха. Однако сравнение масел разного состава по этому показателю не соответствует их поведению в двигателе.

**7.8.7. Стабилизация показателей.** При работе масла в двигателе показатели термоокислительной стабильности изменяются. Резкое ухудшение всех показателей происходит в первые часы работы двигателя на свежем масле (рис. 7.4). Однако в дальнейшем эти изменения происходят менее резко за счет долива масла (на рис. 7.4 штриховая линия) и за счет стабилизации масла, работающего в двигателе. Стабилизации способствует фильтрация масла, центрифугирование его внутри валов двигателя, образование антиокислителей фенольного типа и др. Некоторые показатели, как видно из рис. 7.4, практически стабилизируются полностью.

**7.8.8. Коррозионная активность.** Основные компоненты синтетических масел и углеводороды, составляющие основу нефтяных масел, с металлами не реагируют. Коррозионной активностью по отношению к металлам обладают органические кислоты, обычно содержащиеся в маслах и консистентных смазках в виде примеси. Частично они попадают туда из сырья, частично образуются в процессе применения и в некоторых случаях при хранении: в нефтяных маслах – в результате окисления углеводородов, а в синтетических – при гидролизе сложных эфиров (разложении с участием воды).

Содержание органических кислот оценивают, как и в топливах, по количеству щелочи – едкого кали КОН, которое их нейтрализует. Показатель их содержания в 1г смазочного материала называется *кислотным числом*. Для свежих нефтяных масел оно невелико – не более 0,04-0,1 мг КОН/г (в зависимости



от сорта масла), но при работе двигателя многократно возрастает (рис.7.4). Кислотное число свежих синтетических масел выше: диэфирных до 0,22-0,25, а полиэфирных от 4,5 до 6,0 мг КОН/г. Однако при работе двигателей резкого роста кислотного числа этих масел не происходит, у некоторых из них оно даже уменьшается. Возрастание кислотного числа диэфирных синтетических масел вызывается их увлажнением (они более гигроскопичны, чем нефтяные масла). В связи с этим следует принимать меры для их защиты от проникновения атмосферной влаги. В целом коррозионная активность синтетических масел выше, чем нефтяных. В связи с этим требуется специальный подбор металлов и покрытий, стойких в этих маслах.

Коррозионное действие органических кислот в узлах трения проявляется только при повышенных температурах, особенно при нагреве в зоне трения. Синтетические масла, высоким кислотным числом вызывают своеобразный коррозионно-фрикционный точечный износ. Возможно, что возникновение питтингового износа подшипников качения связано с совместным коррозионным и механическим действием на поверхность металла. Контакт с металлом в свою очередь способствует повышению кислотности масла. Однако не существует зависимости между кислотностью свежего масла и коррозией, которую оно вызывает при работе, так как различные кислоты не одинаково активны. Поэтому оценку коррозионности масла производят по изменению веса металлических пластинок в условиях, имитирующих в той или иной степени условия применения, а кислотное число свежего масла определяют для контроля технологии его производства.

**7.8.9. Действие на резину и уплотнительные материалы.** Применяемые в маслосистемах резинотехнические и другие неметаллические детали выполняются из специальных материалов, устойчивых при контакте с предназначенными для них сортами масел. Немаслостойкие сорта резины, паронита и других неметаллических материалов разрушаются вследствие химической и растворяющей активности не примесей, а самой основы масла по отношению к этим материалам. Они постепенно набухают или происходит их усадка, уменьшение прочности, потеря эластичности, появление хрупкости, трещин. Масло при этом загрязняется продуктами взаимодействия с резиной, частицами разрушившихся уплотнений.

Интенсивность действия масел на резину возрастает с повышением температуры. В составе нефтяных масел самыми агрессивными по отношению к резине и парониту являются ароматические углеводороды, затем идут нафтенy; наиболее пассивны парафиновые углеводороды. В связи с этим для ряда авиационных масел установлена норма по нижнему пределу *анилиновой точки* (температуре расслоения масла с анилином: чем она выше, тем меньше ароматических углеводородов в масле). Применяемые в авиационных двигателях марки резины практически устойчивы при использовании стандартных нефтяных масел. Синтетические масла, как правило, отличаются более агрессивным действием на резину и требуют применения специальных устойчивых к ним составов резины.

**7.8.10. Радиационная стойкость.** Одна из форм проявления стабильности масел, тесно связанная со стойкостью к окислению и разложению, – их стойкость к ядерной и космической радиации. Воздействие потоков излучения как

квантового ( $\gamma$ -излучение), так и корпускулярного типа ( $\alpha$ -частицы, протоны, нейтроны и т. д.) в основном имеет энергетический характер. При их поглощении происходит частичный разрыв связей между атомами в молекулах углеводородов или отрыв от них электронов. В результате образуется множество свободных радикалов и ионов, которые кладут начало цепным процессам окисления и полимеризации. Эти процессы приводят к повышению вязкости (при очень большой дозе – вплоть до *желатинизации*) и кислотного числа масел. Отщепление части атомов водорода приводит к появлению высокоуглеродистых продуктов конденсации, масло темнеет. Загущенные масла сначала разжижаются из-за разрушения полимерных цепей загустителя, а затем загустевают аналогично другим маслам.

Масла, которым свойственна высокая стабильность к высокотемпературному окислению и разложению, одновременно отличаются высокой радиационной стойкостью. Существенное изменение свойств авиационных синтетических и нефтяных масел происходит при суммарной дозе поглощенного излучения более  $2 \cdot 10^8$  рад. Антиокислительные присадки практически не повышают радиационной стойкости: в результате взаимодействия с большим количеством активных продуктов они быстро срабатываются.

## **7.9. СВОЙСТВА МАСЕЛ, КОТОРЫЕ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ПРИ ИХ ХРАНЕНИИ И ОБСЛУЖИВАНИИ ПОЛЕТОВ**

**7.9.1. Сроки хранения масел.** Соблюдение обычных условий хранения – исключение прямого нагрева солнечными лучами, обеспечение условий для минимального суточного колебания температуры, антикоррозионное внутреннее покрытие складских емкостей, раздельное хранение масел различного назначения – позволяет сохранять исходное качество масла в течение многих лет. У нефтяных масел вследствие крайне медленного окисления возможно только незначительное повышение кислотного числа, срок хранения в условиях холодного и умеренного климата 15 лет, жаркого климата – 10 лет.

Большие сроки хранения обеспечены антиокислительными присадками и для некоторых сортов синтетических и полусинтетических масел. Проверена и допущена 10-летняя продолжительность хранения масла 36/1КУА и ИПМ-10 в любых климатических условиях, 15-летняя для масла Б-3В в условиях холодного и умеренного климата (в жарком климате 10 лет). Однако синтетические и полусинтетические масла, содержащие повышенную (3-4%) концентрацию присадки трикрезилфосфата – ВНИИ НП 50-1-4ф, ЛЗ-240, МН-7,5у – менее стабильны, для них предусмотрен срок хранения 5 лет во всех климатических районах.

**7.9.2. Сроки замены масел.** Стабилизация большинства показателей качества свежего масла после быстрого их ухудшения в первые часы работы двигателя на нем и сохранение при этом работоспособности мала (см. 7.8.7) является основанием для его длительного использования без замены. Если в течение установленного ресурса ГТД стабилизируются все показатели, то замена масла до выработки ресурса двигателя практически не требуется. Этот подход может быть реализован применительно к ряду синтетических масел.

Другой подход к определению срока службы масла необходим, если какие-либо свойства масел продолжают ухудшаться в течении срока службы ГТД и

могут достигнуть уровня, недопустимого для нормальной эксплуатации. В этом случае на основании химмотологических испытаний и опыта эксплуатации определяют срок замены масла по времени работы двигателя после предыдущей замены с учетом сохранения некоторого "запаса качества" к моменту замены. Такой подход является традиционным в отношении нефтяных масел. Кроме того, по соображениям возможного ухудшения неконтролируемых свойств масел устанавливают календарный срок службы масла в годах. Конкретные сроки замены масел указаны в нормативно-технической документации на ЛА и ГТД.

Однако, с целью снижения расхода дорогостоящих масел и уменьшения трудозатрат на обслуживание авиационной техники, вместо регламентированных сроков замены масел для ряда ГТД установлен предельный срок наработки масел по состоянию. Контроль состояния производится по вязкости (например, для масла МС-8п вязкость при  $50^{\circ}\text{C}$  не более  $10 \text{ мм}^2/\text{с}$ , МС-8рк –  $11 \text{ мм}^2/\text{с}$ , для масла ИПМ-10 вязкость при  $100^{\circ}\text{C}$  не более  $5,0 \text{ мм}^2/\text{с}$ ) и по кислотному числу (для масел МС-8п и МС-8рк – не более  $1,0 \text{ мг КОН на } 1 \text{ г}$ , ВНИИ НП 50-1-4ф и ВНИИ НП 50-1-4у –  $3,5$ , ИПМ-10 –  $4,0$ ). Для этого производится периодический отбор проб (через 50 или 100 часов, начиная с достижения срока наработки, предусмотренной регламентом). Замену масел производят в случае выхода значений определяющих параметров за установленные пределы.

Для масел МС-8п и МС-8рк, регламентированный срок службы которых по наработке  $100_{-10}^{+20}$  часов, устанавливают срок службы до замены по состоянию  $200_{-20}^{+40}$  часов без ограничений по календарному сроку службы. При наработке масел МС-8п, МС-8рк свыше  $100_{-10}^{+20}$  часов в случае досрочного снятия гарантийных двигателей с эксплуатации по отказам маслосистемы рекламаций промышленности не предъявляют.

Эти масла и маслосмеси, в состав которых они входят, заменяют также в случае слива в связи с устранением дефектов маслосистемы, если масло выработало 50% установленной регламентом предельной наработки в двигателях самолетов фронтовой авиации и 75% – в двигателях других ЛА. Слитое масло считается отработанным. Если же наработка масла меньше, то его сливают в чистую, плотно закрывающуюся тару, а после устранения дефектов возвращают в маслосистему с помощью штатных средств заправки. Предварительно удаляют отстой и проверяют чистоту масла.

**7.9.3. Застывание масел.** При низкой температуре масла зимой, а в холодных регионах – круглый год возможность слива и перекачки из одних наземных емкостей в другие определяется температурой застывания масла.

Масла не имеют четкой температуры перехода из жидкого в твердое состояние. Границей перехода условно считают температуру застывания, при которой происходит потеря подвижности масла. Застывание может быть вызвано двумя различными процессами: постепенным повышением вязкости вплоть до превращения масла в аморфную стекловидную массу с неупорядоченным расположением молекул (не имеющую признаков кристаллического строения) или же образованием кристаллического каркаса из высокоплавких парафиновых углеводородов.

При производстве нефтяных масел для обеспечения низкой температуры застывания из них удаляют высокоплавкие парафины. В некоторые сорта масла вводят специальные присадки – депрессаторы, препятствующие росту и срастанию кристаллов парафинов. Депрессатор может снизить температуру застывания масел на 20-30<sup>0</sup>С. При отсутствии или незначительном содержании парафиновых углеводородов депрессатором нельзя задержать застывание масла, обусловленной повышением вязкости.

Следует иметь в виду, что нижний температурный предел запуска холодного двигателя связан с вязкостно-температурной характеристикой масла: он обычно значительно выше температуры застывания и непосредственно с ней не связан. При температуре застывания и более низкой температуре практически невозможен слив масла, а для его заправки в маслосистему требуется подогрев.

Поскольку синтетические масла, как правило, имеют температуру застывания не выше –60<sup>0</sup>С, это для них не составляет проблемы. Нефтяные маловязкие масла могут вызвать трудности только в холодных районах. Проблема практически относится к маслосмесям ТВД, что является одной из причин применения вместо них масла МН-7,5у.

**7.9.4. Обращение с синтетическими маслами.** Длительно действие синтетического масла может повредить изоляцию электропроводки и другие элементы внешней обвязки двигателя. В связи с этим их покрывают маслостойкими лаками и тщательно следят за чистотой внешних поверхностей двигателей. Вследствие *ядовитости* присадок при работе с синтетическими маслами должны соблюдаться меры предосторожности. Работать нужно только в спецодежде (комбинезоне, халате, фартуке). Нельзя допускать попадания масла в глаза и на кожный покров, руки следует покрывать специальной пленкообразующей пастой. Вблизи рабочего места нельзя есть, пить и курить; перед едой спецодежда должна быть снята и руки тщательно отмыты горячей водой с мылом. В случае попадания масла на кожу, одежду, инструмент, а также на наружные поверхности двигателя его нужно удалить ветошью, смоченной керосином, а затем промыть кожу и одежду водой с мылом.

Пленкообразующая паста готовится службой ГСМ на основе казеина и спиртового раствора с добавкой глицерина и аммиака. Смывать ее следует горячей водой с мылом после работы.

## **7.10. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ ГТД**

**7.10.1. Общий подход.** Испытания масел непосредственно на ГТД принципиально отличаются от испытаний топлив информативностью проб масла, отбираемых по мере наработки двигателя, и возможностью их регулярного отбора (через каждые несколько часов). Однако при этом сохраняется вероятность того, что не связанные с влиянием масла дефекты и отказы техники будут ошибочно приписаны воздействию масла.

Поэтому роль квалификационных испытаний авиационных масел по утвержденному комплексу методов (КМКО) остается аналогичной роли квалификационных испытаний топлив (см. п. 3.10.1).



**7.10.2. Состав КМКО масел авиационных ГТД и редукторов вертолетов.** Комплекс включает 16 методов квалификационной оценки функциональных, физико-химических и эксплуатационных свойств масел, а также их состава (содержания присадок). Из них на 5 методов имеются ГОСТы, остальные методы испытаний утверждены Государственной межведомственной комиссией.

Определяется кинематическая вязкость масла в мм<sup>2</sup>/с при максимальной рабочей температуре по ГОСТ 33; смазочные свойства на четырехшариковой машине трения (критическая нагрузка и диаметр пятна износа по ГОСТ 9490); работоспособность масел и маслосмесей на редукторной установке (с количественными показателями); стабильность вязкости масел, содержащих вязкостные полимерные присадки (на диспергаторе УЗДН).

Склонность масел к образованию высокотемпературных отложений определяется двумя методами: на установке ВЦМ и на приборе "наклонная плита". Испаряемость масел в чашечках определяется по ГОСТ 20354, вспениваемость по ГОСТ 21058.

По методу ВИАМ оценивается коррозионная агрессивность масел (в течение 100 часов), по ГОСТ 9.054 защитные свойства масла при погружении в электролит (в камере Г-4). Оцениваются воздействие масел на уплотнительные резины, гигроскопичность масел, гидролитическая стабильность синтетических масел.

Проверяется содержание присадок в масле (с помощью тонкослойной хроматографии), совместимость масел и масел с присадками. Прогнозируются сроки хранения масел.

## Глава 8

### ТОПЛИВА И МАСЛА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

#### 8.1. БЕНЗИНЫ

**8.1.1. Специфика рабочего процесса.** Поршневые двигатели с принудительным (искровым) зажиганием, топливом которых служит бензин, в современной авиации имеют ограниченное применение (в ВВС их используют в учебной и штабной авиации, в гражданской авиации – на региональных и местных авиалиниях, на санитарных и спортивных самолетах, в сельскохозяйственной авиации). В силовых установках боевых летательных аппаратов и магистральных гражданских самолетов их давно уже не применяют. Соответственно ограничено производство и применение авиационных бензинов. Однако в авиации сохраняются сложившиеся много лет назад высокие требования к химмотологическому соответствию качества авиационного бензина и рабочего процесса авиационных поршневых двигателей, которые достигли высокой степени совершенства на последней стадии их широкого применения.

Главным потребителем бензинов являются десятки миллионов автомобильных двигателей. Хотя в рабочем процессе автомобильных и авиационных поршневых двигателей есть различия, отражающиеся на потребном качестве топлива, общими и для тех и для других являются две характерных особенности. Первая – цикличность рабочего процесса, требующая быстрого испарения и, следовательно, хорошей *испаряемости* топлива. Вторая – резкое сжатие рабочей смеси перед сгоранием, способное вызвать детонацию в случае недостаточной *детонационной стойкости* топлива.

Цикличность накладывает жесткое ограничение на располагаемое время смесеобразования, воспламенения и сгорания (сотые доли секунды). Легко испаряющаяся смесь жидких углеводородов, из которых состоит бензин, обеспечивает протекание этих процессов за требуемое время при соответствии бензина установленным нормам качества.

Повышение давления, а вследствие этого и температуры сжимающегося объема углеводородо-воздушной смеси, который находится перед фронтом пламени и сгорает в последнюю очередь, создают условия для его детонации. Чтобы избежать детонации, в состав бензина при его производстве вовлекают углеводороды требуемой детонационной стойкости, а также используют антидетонатор.

Испаряемость и детонационная стойкость бензина играют решающую роль в реализации нормального рабочего процесса поршневых двигателей с принудительным зажиганием. Другие показатели качества бензинов, характеризующие неизменность его состава при хранении и применении до участия в рабочем процессе двигателя, ограничение вредного влияния на материалы и на окружающую среду, удобства обращения с ними в эксплуатации аналогичны соответствующим показателям нефтяных топлив для ГТД, хотя по величине от них отличаются. Так, более жесткие нормы установлены по массовой доле серы, поскольку возможно проникновение продуктов ее окисления в картер и накопление серной кислоты в масле. Не регламентирована удельная теплота сгорания, которая определена углеводородным составом бензина и несколько выше, чем у топлив ГТД.

**8.1.2. Испаряемость.** Быстрое испарение бензина позволяет еще до подачи искры получить однородную подготовленную к сжиганию топливоздушную смесь. На смесеобразование в рабочем цикле отводится время около 0,02с. Степень испарения бензина за этот промежуток времени существенно зависит от его фракционного состава и в свою очередь влияет на эксплуатационные характеристики двигателя. Запуск холодного двигателя при низкой температуре тем легче, чем ниже температура выкипания 10% объема топлива (эту фракцию называют пусковой). Для авиабензина и автомобильных бензинов летнего и зимнего вида установлены разные значения верхнего предела температуры выкипания этой фракции, соответствующие условиям их применения.

Время прогрева двигателя и его приемистость (время перехода с малого газа на максимальный режим) сокращаются с понижением температуры выкипания 50%-ной фракции бензина. Для обеспечения требуемой времени приемистости 1-2 сек должна быть не выше установленной нормы для каждого сорта бензина.

Полнота испарения бензина и равномерность состава смеси по цилиндрам двигателя зависят от температуры выкипания 90%-ной фракции бензина. Если она оказывается слишком высокой, то в некоторые цилиндры карбюраторных двигателей часть топлива со стенок трубопроводов попадает в виде жидкой пленки. В результате этого двигатель не развивает требуемой мощности, ухудшается его экономичность, а неравномерность состава смеси вызывает тряску. Температура выкипания 97,5%-ной фракции бензина (или конца кипения) также сказывается на экономичности двигателя и, кроме того, влияет на нагарообразование, на разжижение масла в картере несгоревшим остатком топлива и, в конечном счете, на износ и срок службы двигателя.

Чтобы бензин не закипал в жаркую погоду, нормируется нижний предел температуры начала его кипения, во избежание кавитации в полете – верхний предел давления его насыщенных паров. Для облегчения запуска авиационных двигателей в зимнее время нормируется также нижний предел давления его насыщенных паров.

Условия в авиационном поршневом двигателе способствуют испарению бензина: он распыливается под давлением и попадает в горячий воздух, сжатый в нагнетателе. В автомобильном двигателе бензин, как правило, подсасывается не подогретым воздухом, проходящим через карбюратор. Поэтому в состав автомобильного бензина вовлекают более легкую, чем в авиабензины, "головную" фракцию: автобензины имеют более высокое давление насыщенных паров и более низкую температуру начала кипения. Это допустимо ввиду меньшей опасности возникновения паро-воздушных пробок, чем при низком атмосферном давлении на высоте, однако способствует потерям от испарения при хранении, транспортировании и перекачке бензина.

По "хвостовой" фракции (выкипающей в последнюю очередь) автомобильные бензины тяжелее, чем авиационные. Это делается для увеличения количества и удешевления автомобильного бензина, но приводит к некоторому ухудшению экономичности автомобильных двигателей. Таким образом, автомобильные бензины имеют более широкий фракционный состав, чем авиационные.

**8.1.3. Детонационная стойкость.** После зажигания топливно-воздушной смеси электрической искрой фронт пламени распространяется по камере сгорания в течение нескольких миллисекунд. Расширяющиеся продукты сгорания резко сжимают еще не сгоревшую смесь перед фронтом пламени. Происходит сильный разогрев последней порции смеси и ее быстрое предпламенное окисление с образованием легко взрывающихся гидропероксидов  $C_nH_mCH_2COOH$ . Если до конца сгорания не достигается взрывная концентрация пероксидов, то двигатель работает нормально. Если же взрыв пероксидов опережает сжигание еще не сгоревшего остатка смеси во фронте пламени, то в цилиндре возникают ударные волны, происходит детонация с резкой теплоотдачей в стенки. Она вызывает перегрев и постепенное разрушение деталей цилиндро-поршневой группы.

Интенсивность образования гидропероксидов и, соответственно, возможность детонации определяются углеводородным составом бензина. Высокая детонационная стойкость свойственна *изопарафинам* (она тем выше, чем более разветвлен углеродный скелет их молекул), многим нафтенам и ароматическим углеводородам (последним – при работе двигателя на богатой смеси  $\alpha=0,6-0,8$ ). Низкая детонационная стойкость свойственна *нормальным* парафинам, в особенности с длинной цепочкой атомов углерода в молекуле. Существенно повышает детонационную стойкость бензина присадка антидетонатора – тетраэтилсвинца  $Pb(C_2H_5)_4$  (порядка 0,3%). Он замедляет процесс образования взрывчатых гидропероксидов.

Возникновение детонации зависит от условий и режима работы двигателя. Детонационные характеристики авиационных двигателей, мощность которых регулируют изменением давления наддува  $p_k$ , представляют в виде зависимости предельно допустимого  $p_k^*$ , соответствующего началу детонации, определяемому с помощью детонатора, от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Авиадвигатели на высоких температурных режимах имеют максимум детонационной стойкости (максимальное  $p_k^*$ ) при состав смеси  $\alpha = 0,5-0,6$  (богатая смесь) и минимум при  $\alpha = 1,0-1,1$  (бедная смесь). Это позволяет при работе двигателя на богатой смеси устанавливать более высокий наддув и получать большую мощность двигателя, чем при работе на бедной смеси. Поэтому качество авиационных бензинов регламентируют по двум показателям: октановому числу по "моторному" методу на бедной смеси и сортностью на богатой смеси (в марке бензина их указывают соответственно дробью, например Б-91/115).

Снижение температурного режима до уровня, соответствующего зимним условиям работы двигателя, вызывает понижение детонационной стойкости на богатой смеси и повышение на бедной. Иначе говоря, на максимальных режимах авиадвигателя детонация вероятнее при низкой температуре воздуха, а на крейсерских – при высокой (рис. 8.1.).

Внешних признаков детонация в авиадвигателе не проявляет: шумовой эффект работы двигателя перекрывает стук, вызываемый ударными волнами. Гарантию бездетонационной работы авиадвигателя обеспечивают строгим соблюдением качества бензинов по показателям детонационной стойкости.

Детонационные характеристики автомобильных двигателей, мощность которых регулируют изменением частоты вращения коленчатого вала двигателя, представляют как зависимость угла опережения зажигания  $\beta^*$ , соответствующе-



го началу детонации, от частоты вращения  $n$  (рис. 8.2). С увеличением угла опережения зажигания  $\beta$  (в практически целесообразном диапазоне) возрастают максимальное давление и максимальная температура топливовоздушной смеси перед сгоранием, что может вызвать детонацию. Поскольку автомобильные двигатели работают на бедном (экономичном) составе смеси, характеристика их детонационной стойкости на богатой смеси не представляет практического интереса.

Для каждой частоты вращения существует наивыгоднейшее значение  $\beta$ , при котором мощность наибольшая, а удельный расход топлива наименьший. Чем больше частота вращения, тем больше оптимальный угол. Если его нельзя достигнуть из-за возникновения детонации, то бензин непригоден для работы двигателя с оптимальной регулировкой зажигания. Для использования такого бензина во избежания детонации приходится занижать  $\beta$ . Следствием этого является повышенный расход топлива, перегрев и ускоренное изнашивание двигателя (хотя и не такой значительный, как при детонации). Бензины различного химического состава проявляют разную "чувствительность" к изменению частоты вращения двигателя (ср. детонационные характеристики бензинов А и Б на рис. 8.2). Поэтому качество автомобильных бензинов регламентируют двумя показателями: по октановому числу по "моторному" методу применительно к работе двигателя на режиме высокой частоты вращения (например, А-76) и октановому числу по "исследовательскому" методу применительно к пониженному рабочему режиму (в марке бензина перед величиной октанового числа ставится буква И, например АИ-93).

Поскольку уровень шума автомобильных двигателей невысокий, появление детонации при их работе обычно сразу же обнаруживается по металлическому стуку, вызываемому ударными волнами (иногда его ошибочно принимают за стук поршневых пальцев). Сильная детонация вызывает неравномерность работы двигателя и ощутимую тряску.

**8.1.4. Показатели детонационной стойкости.** Каждую партию бензина проверяют на соответствие ее качества нормам, установленным для данного бензина путем испытания на тех двигателях, для которых он предназначен. Проверку производят на малоразмерных одноцилиндровых установках с изменяемой степенью сжатия путем сравнения бензина с *эталонными топливами* в стандартных условиях. Основным эталоном служит *изооктан*  $C_8H_{18}$  (2,2,4-триметилпентан) – углеводород с высокой детонационной стойкостью, условно принятой за 100. В качестве второго эталона применяют *нормальный гептан*  $C_7H_{16}$ , низкая детонационная стойкость которого условно принята за нуль. Их смеси, составленные в различном процентном (по объему) соотношении, представляют собой топливные эквиваленты от 0 до 100 – шкалу *октановых чисел*.

Октановым числом бензина – показателем его детонационной стойкости на бедной смеси считается процентное содержание изооктана в эталонной смеси с нормальным гептаном, которая ему равноценна: выходит на режим стандартной интенсивности детонации при одной и той же степени сжатия. При этом состав смеси регулируют на наибольшую склонность к детонации, которая проявляется при  $\alpha = 1,0-1,1$  (бедная смесь).

В России для определения показателей детонационной стойкости применяют установки ИТ9 различных типов, в основном соответствующие используемым для этой цели за рубежом установкам американской фирмы Вокеша. Октановые числа по "моторному" и по "исследовательскому" методу (названия методов связаны с историей их разработки) определяют на установках, соответственно, ИТ9-2, ИТ9-6, различающихся между собой частотой вращения и температурным режимом, или на универсальной установке УПТ-65. Автомобильные бензины, которые содержат крекинговые компоненты, менее "чувствительны" к режиму работы двигателя, чем парафиновые эталонные топлива (смеси изооктана с гептаном). Поэтому, как видно из рис. 8.3, они имеют по "исследовательскому" методу более высокие октановые числа, чем по "моторному" методу: характеристика бензинов при меньшей частоте вращения ("исследовательский" метод) совпадает с характеристикой более высокого эталона.

Детонационная стойкость авиационных бензинов на режимах полной мощности авиадвигателей, когда они в целях внутреннего охлаждения работают на богатой смеси ( $\alpha \approx 0,6$ ), совершенно иная, чем выражаемая октановым числом детонационная стойкость на бедной смеси. При этом она выше 100, то есть смеси изооктана с гептаном как эталоны на богатой смеси непригодны. Эталоны выше 100 получают путем добавки к изооктану антидетонатора – тетраэтилсвинца. Эталоны протарированы применительно к авиационному двигателю при  $\alpha = 0,6$  по мощности (в процентах относительно чистого изооктана), которая достигается путем повышения наддува двигателя до начала детонации (рис. 8.4). Этот показатель детонационной стойкости авиабензинов, именуемый сортностью на богатой смеси, определяют на установке ИТ9-1. Сортность бензина принимают равной сортности эталонного топлива, которое начинает детонировать при достижении одной и той же мощности на богатой смеси ( $\alpha = 0,6$ ).

**8.1.5. Антидетонаторы.** В течение многих лет для получения высокооктановых бензинов используется присадка тетраэтилсвинца  $Pb(C_2H_5)_4$ . При работе двигателя происходит предпламенное разложение ТЭС и окисление свинца в  $PbO_2$ . Его молекулы "перехватывают" одновременно образующиеся молекулы пероксидов  $C_nH_mCH_2COOH$ , превращая пероксиды в менее активные альдегиды. Достижение критической (взрывной) концентрации пероксидов происходит при более жестких условиях рабочего процесса двигателя, чем при отсутствии ТЭС. Добавление первых малых количеств ТЭС (до 2,5-3,3г/кг) весьма эффективно (рис. 8.4). Дальнейшее увеличение его содержания в бензине мало повышает детонационную стойкость, но зато отрицательно влияет на надежность двигателя (в цилиндре увеличиваются отложения оксидов свинца), а также дезактивирует катализаторы, используемые для дожигания продуктов неполного сгорания бензина. На двигателях с большими сроками службы желательно применять бензины с меньшим содержанием ТЭС или еще лучше чистые бензины (если они имеют достаточную детонационную стойкость). ТЭС вводится в бензин в составе *этиловой жидкости* – смеси с выносителями (бром- и хлорпроизводными углеводородов). Реагируя с ними, свинец после сгорания превращается в летучий при высокой температуре бромид свинца и в основном удаляется из камеры сгорания вместе с выхлопными газами.

ТЭС – *сильный яд*, действующий на нервную систему и кровь [36]. Он способен накапливаться в организме, поэтому отравление им может быть обнаружено спустя длительное время. Попадание его в пищеварительный тракт может привести к смерти. Этилированными бензинами нельзя мыть руки и одежду: после испарения бензина на них остается тетраэтилсвинец, он способен проникать в организм через кожу. Попадающий в атмосферу бромид свинца также ядовит.

При длительном хранении бензина ТЭС постепенно окисляется, разлагается и вступает в реакции с продуктами окисления углеводородов. В результате образуется белый осадок (в сухом виде тонкая, едкая пыль, содержащая 50-60% свинца), который может нарушить нормальную работу топливной аппаратуры. Следует иметь в виду, что осадок этот ядовит. О разложении ТЭС свидетельствует помутнение бензина. Разложение ТЭС может также привести к возникновению детонации на двигателях. Для повышения стабильности растворенного в бензине ТЭС в авиабензины добавляется стабилизатор – параоксидифениламин или дибутилкризол (ионол, агидол-1), или же агидол-12 (побочный продукт при производстве ионола). Он тормозит окисление и разложение ТЭС. Эти же антиокислители вводят в автомобильные бензины для торможения окисления и смолообразования.

Чтобы обеспечить большие моторемонтные сроки службы автомобильной техники, нужно исключить или, по крайней мере, ограничить содержание в бензине ТЭС, добавка которого позволяет из дешевых низкооктановых бензинов получить сорта с достаточно высоким октановым числом. Возникает обычное противоречие: удешевление бензина и увеличение его количественного ресурса приводят к уменьшению надежности, ухудшению экологичности и удорожанию эксплуатации двигателей. В связи с этим в одни сорта автомобильных бензинов ТЭС вводят в небольшом количестве (в 3-8 раз меньше, чем в авиационные), а в другие его вообще не вводят и получают требуемое октановое число путем добавки более дорогих высокооктановых углеводородных компонентов или метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ). Добавка МТЭБ повышает октановое число и полноту сгорания, но не допустима в количестве более 15%, так как он уменьшает теплоту сгорания и разрушает резину.

Ограничение содержания ТЭС в автомобильных бензинах связано прежде всего с соображениями безопасности населения. Продукты сгорания, содержащие значительное количество ядовитого соединения свинца, отравляли бы атмосферу больших городов. С автомобильными бензинами имеет дело множество людей, в том числе не проинструктированных, и очень трудно гарантировать соблюдение необходимых мер предосторожности при обращении с ядовитыми высокоэтилированными бензинами.

В составе некоторых бензинов используют новый неядовитый антидетонатор – *циклопентадиенилтрикарбонилмарганец*  $C_5H_5Mn(CO)_3$ , сокращенно – ЦТМ – кристаллическое золотистое вещество с температурой плавления 73<sup>0</sup>С. По антидетонационной эффективности он не уступает ТЭС. Добавка ЦТМ к 72-октановому неэтилированному бензину в количестве 1г/кг позволяет получить 80-октановый бензин. ЦТМ можно использовать также для дальнейшего повышения октанового числа этилированных (содержащих ТЭС) бензинов

примерно на шесть единиц. Однако образование нагара, состоящего из окислов металла, свойственно ЦТМ не меньше, чем ТЭС.

**8.1.6. Сорта авиационных бензинов.** *Основной сорт авиабензина Б-91/115* (ГОСТ 1012-72) с октановым числом по "моторному" методу не ниже 91 (на бедной смеси) и сортностью на богатой смеси не ниже 115 применяется на двигателях со степенью сжатия  $6,5 \pm 0,1$  АШ-62ИР, М-9Ф, АИ-26В и М-14 различных модификаций, установленных на самолетах Ан-2, Ан-14, Су-49, Вильма-35А2, вертолетах Ми-1 и Ка-26. Он содержит ТЭС до 2,5г/кг, обеспечивающий требуемую детонационную стойкость этого бензина. Бензин окрашен в зеленый цвет.

Дублирующим сортом, не имеющим режимных ограничений, является вырабатываемый по ТУ бензин Б-92, содержащий не более 2г/кг ТЭС. Его октановое число согласно ТУ не ниже 91,5, а сортность на богатой смеси не нормируется, но фактически близка к сортности бензина Б-91/115. Второй дублирующий сорт – бензин более высокой детонационной стойкости Б-95/130 (ГОСТ 1012-72), основное назначение которого – эксплуатация ЛА с двигателями АШ-82Т и АШ-82В, единичные экземпляры которых могут еще сохраниться в эксплуатации. Стандарт допускает содержание ТЭС в этом бензине до 3,1г/кг – больше, чем в бензинах других марок.

В качестве резервных рассматриваются стандартные автомобильные бензины АИ-93, АИ-95 летнего вида, а также вырабатываемые по ТУ бензины АИ-95 и АИ-96. Возможность работы двигателя АШ-62ИР на бензине АИ-93 проверена испытаниями самолета Ан-2.

Предназначенный для первоначального обучения летчиков военной авиации новый самолет Су-49 с двигателем М-9Ф эксплуатируют на бензине Б-91/115, а в качестве резервных используют близкие по октановому числу автобензины.

Базовым компонентом при производстве авиационных бензинов являются бензины каталитического риформинга, при котором происходит ароматизация и изомеризация исходного прямогонного бензина. Это повышает его детонационную стойкость. Дополнительно вводятся компоненты, еще более стойкие к детонации – алкилат, изооктан, изопентан, толуол.

**8.1.7. Сорта автомобильных бензинов.** *Основной сорт автомобильного бензина А-76* (ГОСТ 2084-77) с октановым числом по "моторному" методу не ниже 76 предназначен для разнообразной наземной техники, в том числе для подвижных средств аэродромно-технического обеспечения полетов, технических средств содержания аэродромов, грузовых автомобилей. В основном применяют бензин А-76 этилированный, содержащий до 0,17 г/л свинца (что примерно соответствует 0,4г/кг ТЭС) – в несколько раз меньше, чем в авиационных бензинах. Бензин А-76 окрашен в желтый цвет. Он представляет собой дешевый бензин А-72, детонационная стойкость которого повышена за счет добавки ТЭС. Более дорогой неэтилированный бензин А-76 в основном применяют в тех городах и районах, а также в аэропортах, где главным санитарным врачом запрещено применение этилированных бензинов.



Бензин А-72 (неэтилированный) службами тыла авиации не используются ввиду недостаточной детонационной стойкости. Чтобы обеспечить работу поршневых двигателей современной наземной техники на этом бензине, нужно занизить угол опережения зажигания, что предотвратит детонацию, но понизит мощность и существенно ухудшит экономичность двигателей.

Бензины с более высоким октановым числом, выпускаемые по ГОСТ 2084-77, марок АИ-91 (оранжево-красного цвета), АИ-93, АИ-95 и АИ-98, а также марки А-92, выпускаемый по ТУ (их маркируют по октановому числу по "исследовательскому" методу), предназначены для легковых автомобилей, двигатели которых имеют высокую степень сжатия. Бензин А-93 предназначен также для автомобилей Урал-375 и Урал-375Д (в исключительных случаях на них разрешено использовать бензин А-76, при условии уменьшения угла опережения зажигания на  $6^0$ ). В бензинах АИ-91, А-92 и АИ-93 допускается содержание ТЭС (норма та же, что для А-76). В неэтилированных бензинах может содержаться ТЭС как максимум 0,03г/кг (0,013 г/л свинца).

Наибольшим спросом пользуется бензин марки А-92. Этот бензин, а также бензин А-76 производства "Лукойл" вместо ТЭС содержит марганцевый антидетонатор (ЦТМ).

Автомобильные бензины всех марок, кроме АИ-98, вырабатывают двух видов: *летний* для применения с 1 апреля по 1 октября, а в южных регионах круглый год (в северных и северо-восточных районах его не применяют) и *зимний* для всесезонного применения в северных и северо-восточных районах, в остальных районах с 1 октября по 1 апреля. Они различаются по фракционному составу и давлению насыщенных паров.

Главная задача технической политики в области автомобильных бензинов – сокращение, а в дальнейшем прекращение производства и применения этилированных бензинов. В целях выполнения этой задачи, а также повышения конкурентоспособности российских бензинов и доведения их качества до уровня европейских стандартов начато производство четырех новых марок бензинов по ГОСТ Р 51105-97 "Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин. Технические условия".

Бензин "*Нормаль-80*" с октановыми числами не менее 76,0 по "моторному методу" и не менее 80,0 по "исследовательскому методу", допустимым содержанием марганца 80,0мг/л предназначен для использования на грузовых автомобилях наряду с А-76. Бензин "*Регуляр-91*" с октановыми числами не менее 32,5 по "моторному методу" и не менее 91,0 по "исследовательскому методу", допустимым содержанием марганца 18мг/л предназначен для замены этилированного бензина АИ-93.

Бензины "Премиум-95" и "Супер-98" с октановыми числами соответственно не менее 85,0 и 88,0 по "моторному методу", не менее 95,0 и 98,0 по "исследовательскому методу", не содержащие металлоорганических антидетонаторов, которые полностью отвечают европейским требованиям, предназначены для легковых автомобилей иностранного производства.

В целях упорядочения норм качества и состава неэтилированных бензинов, выпускаемых различными производителями по ТУ, введен ГОСТ Р 51313-99

"Бензины автомобильные. Общие технические требования". Соответствие всех бензинов этому стандарту проверяется при их обязательной сертификации.

Получают автомобильные бензины смешением компонентов прямой перегонки и глубокой переработки нефти: каталитического риформинга, изомеризации прямогонных фракций, каталитического и термического крекинга, а также изопентана, толуола, метил-трет-бутилового эфира. Это обеспечивает максимальное использование ресурсов нефти для производства высокооктановых автомобильных бензинов. Чтобы уменьшить окисление и смолообразование, свойственное термокрекинговому компоненту, который содержит непредельные углеводороды на месте производства бензина определяется индукционный период. Время до начала окисления в жестких условиях испытания должно быть не менее 10-20 ч в зависимости от сорта бензина, если же бензин предназначен для длительного хранения, то не менее 20 ч.

Исправление некондиционных автомобильных бензинов может производиться смешением с другим бензином, имеющим "запас качества". Однако при исправлении бензинов с повышенным содержанием смол следует иметь в виду, что в процессе перекачки и перемешивания процесс смолообразования усиливается, и конечное содержание фактических смол получается больше расчетного.

Бензин, в котором началось разложение ТЭС, нужно профильтровать, добавить ТЭС и расходовать в первую очередь. Следует иметь в виду, что отфильтрованный от такого бензина осадок очень ядовит; фильтры с осадком следует сжигать.

**8.1.8. Стабильность автомобильных бензинов.** Недостаточная стабильность автомобильных бензинов при хранении имеет три основных проявления. Первое – осмоление – относится к тем бензинам, в состав которых входят продукты крекинга, особенно термического. Они содержат непредельные углеводороды, склонные к окислению, полимеризации, и в конечном счете к смолообразованию, особенно при высокой температуре, хранении в малой емкости (где на единицу объема топлива приходится большая площадь каталитически активной металлической поверхности) и не полностью заправленных емкостях, при наличии воды и смолистого налета на стенках емкости. Бензин желтеет. Образовавшиеся смолистые вещества выделяются при работе двигателя в карбюраторе, на фасках клапанов, усиливают нагарообразование, что может привести к неисправностям и отказам.

Второе проявление нестабильности относится к этилированным бензинам – в них может происходить окисление и разложение ТЭС, вызывающее понижение октанового числа и помутнение бензина (см. п. 8.1.4.). Введение антиокислителей уменьшает самообразование и способствует стабильности ТЭС.

Третье проявление нестабильности – испарение легких фракций бензина вследствие высокого давления насыщенных паров. Хорошая организация хранения автомобильных бензинов еще более необходима, чем авиационных. Основные меры, обеспечивающие сохранность качества автомобильных бензинов, следующие: хранение в заглубленных, по возможности в крупных и целиком заполненных емкостях; окраска наземных резервуаров алюминиевой краской; непрерывный полив их в жаркое время водой. Особые трудности связаны с не-

обходимостью в отдельных случаях хранить автомобильный бензин в мелкой таре. Мелкую тару с автомобильным бензином следует особенно тщательно оберегать от солнечных лучей и вообще от нагрева. Емкость следует плотно закрывать пробкой, так как через неплотную пробку в жаркую погоду улетучивается около 1 кг бензина в час. Это отражается не только на количестве, но и на качестве оставшегося бензина.

## 8.2. ДИЗЕЛЬНЫЕ ТОПЛИВА

**8.2.1. Условия применения и особенности дизельных топлив.** Быстроходные дизели – поршневые двигатели с воспламенением от сжатия, работающие с частотой вращения порядка  $1000-2000 \text{ мин}^{-1}$ , устанавливаются на тяжелых грузовых автомобилях, автобусах, тракторах, спецмашинах. Несмотря на большой вес и габариты, сложность и высокую стоимость, при достаточно высокой мощности они выгодней бензиновых двигателей, так как дизельное топливо дешевле высококачественного бензина, а удельный расход топлива при степени сжатия дизелей 14-18 примерно на 30% ниже, чем у бензиновых двигателей.

Специфика сгорания дизельных топлив совершенно иная, чем бензинов. В противоположность необходимому торможению предпламенных процессов, ведущих к накоплению и взрыву пероксидов в бензиновом двигателе с принудительным зажиганием, условием нормальной работы дизеля является быстрое образование и самовоспламенение пероксидов сразу же после впрыска топлива. Чем больше задержка самовоспламенения, тем хуже, так как больше топлива в каждом рабочем цикле успевает поступить в цилиндр и затем одновременно вспыхнуть. Резкое повышение давления приводит к тому, что дизель работает жестко, детали его получают большую динамическую нагрузку. Поэтому в составе дизельных топлив желательны низкооктановые тяжелые парафиновые углеводороды, в молекулах которых длинные прямые углеродные цепочки склонны к окислению с образованием пероксидов. Однако низкотемпературные свойства этих углеводородов плохие: температура кристаллизации высокая, вязкость тоже сравнительно высокая и следовательно, резко растет при понижении температуры.

Дизельные насосы и форсунки выполнены по высшему классу точности и работают с большими нагрузками: зазор в плунжерной паре 1-2 мкм, выходное отверстие форсунки – порядка 0,1-0,2 мм, давление подачи 100-150 МПа в автомобильных дизелях и около 12 МПа в тракторных. Они нормально работают только в узком диапазоне вязкости топлива. Ввиду этого оказывается необходимым в разных климатических и сезонных условиях применять различные сорта дизельных топлив. В жарких районах круглый год, а в умеренном климатическом поясе летом применяют высоkozастывшие (около  $-10^{\circ}\text{C}$ ), относительно вязкие топлива, которые хорошо самовоспламеняются в дизеле. В холодных районах круглый год, а в умеренном климате зимой вынуждены применять в ущерб самовоспламеняемости низкозамерзающие топлива, имеющие при стандартной температуре  $20^{\circ}\text{C}$  меньшую вязкость. Но при низкой температуре зимой они обладают практически такой же вязкостью, как летние топлива при высокой рабочей температуре летом. Для каждого сорта дизельного топлива установлен верхний предел температуры помутнения, обеспечивающий в соот-

ветствующих климатических и сезонных условиях прокачку топлива через фильтры, а также верхний предел температуры застывания, обеспечивающий подвижность топлива в магистралях, возможность его перекачки и заправки без подогрева, слив из баков и отстойников.

Специфичные требования предъявляются к испаряемости дизельного топлива: быстрое испарение легких фракций ухудшает пуск дизеля и процесс сгорания в нем, так как приводит к понижению температуры сжатого воздуха и увеличению задержки самовоспламенения. Ограничение легких фракций контролируется по нижнему пределу температуры вспышки. В дизельных топливах, вырабатываемых из тяжелых нефтяных фракций, в том числе получаемых из сернистых нефтей, содержатся больше соединений серы, чем в более легких реактивных топливах и бензинах – до 0,5%. При этом наличие свободной серы исключено, а активной меркаптановой серы допускается не более 0,01% (доводится гидроочисткой). При сгорании образуется  $SO_2$ , а затем серный ангидрид  $SO_3$ , который реагирует с водяным паром и превращается в серную кислоту. Кислота вызывает коррозию подшипников, взаимодействуя с маслом, образует смолистые вещества, усиливает нагарообразование и дымление, способствует износу.

**8.2.2. Самовоспламеняемость.** В каждом рабочем цикле дизеля давление воздуха в цилиндре к концу такта сжатия поршнем достигает 3,5-4МПа (рис.8.5), а температура воздуха вследствие сжатия поднимается до 500-700<sup>0</sup>С. За несколько градусов поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки начинается впрыск топлива (точка 1 на рис. 8.5). Вырываясь из форсунок под давлением до 150 МПа, создаваемом плунжерами топливного насоса, конус топлива разрывается на миллионы капель размером в несколько микрометров, испаряется в горячем воздухе и смешивается с ним. Сразу же в первых порциях образующейся смеси паров топлива с воздухом возникает интенсивный процесс окисления углеводородов с образованием легко взрывающихся органических пероксидов – такой же процесс, как перед детонационным взрывом в двигателе с искровым зажиганием, но в множестве малых объемов. Самовоспламенение многочисленных мелких очагов, в которых успели образоваться пероксиды, приводит к появлению факела горящего топлива ( точка 2 на рис. 8.5).

Время поворота вала на угол между точками 1-2 представляет собой *период задержки самовоспламенения от начала впрыска топлива до появления первых очагов пламени, вызывающих повышение давления в цилиндре*. Он характеризует самовоспламеняемость дизельного топлива. В течение этого времени топливо накапливается в цилиндре, испаряется, химически подготавливается к сгоранию, но еще не горит. После наступившего с запаздыванием воспламенения оно почти мгновенно сгорает, вызывая резкое нарастание давления (на рис.8.5 участок 2-3). При большом периоде задержки самовоспламенения дизель работает жестко, со стуком, испытывает большие динамические нагрузки на детали. При хорошей самовоспламеняемости дизель работает мягко, плавно. Считается, что для этого скорость нарастания давления должна быть не более 4МПа на 1<sup>0</sup> поворота коленчатого вала.

В следующий период (на рис. 8.5 между точками 3-4) топливо из форсунки сразу попадает в горящий факел и сгорает по мере поступления в цилиндр. Когда



впрыск топлива заканчивается (точка 4), почти сразу же завершается сгорание. Догорание происходит в случае очень большой задержки самовоспламенения, слишком высокой вязкости и чрезмерно высокой температуре конца кипения.

Самовоспламеняемость дизельных топлив оценивают аналогично оценке детонационной стойкости бензинов – на малоразмерных одноцилиндровых установках с изменяемой степенью сжатия путем сравнения с эталонными топливами в стандартных условиях. Основным эталонным топливом, самовоспламеняемость которого принята за 100, выбран нормальный парафиновый углеводород *цетан* (гексадекан)  $C_{16}H_{34}$ . Второе эталонное топливо бициклический ароматический углеводород  $\alpha$ -метилнафталин  $C_{11}H_{10}$  (продукт перегонки каменного угля), его самовоспламеняемость принята за ноль. Их смеси, составленные в различном (по объему) соотношении, представляют собой эквиваленты дизельных топлив.

Показателем самовоспламеняемости дизельного топлива считается *цетановое число*, численно равное процентному содержанию цетана в эталонной смеси с  $\alpha$ -метилнафталином, которая ему равноценна: выходить на режим стандартного периода задержки самовоспламенения при одной и той же степени сжатия.

В России для определения цетанового числа применяют установки ИТ 9-3 или УИТ-65, в основном соответствующие используемым для этой цели за рубежом установкам американской фирмы Вокеша. На стандартном режиме их работы опережение начала впрыска топлива равно  $13^0$  до верхней мертвой точки (рис. 8.5). При работе на каждом топливе подбирают такую степень сжатия, чтобы самовоспламенение происходило в верхней мертвой точке, то есть период задержки самовоспламенения соответствовал углу поворота коленчатого вала на  $13^0$ . Для определения этого угла имеется специальный стробоскопический индикатор с неоновыми лампочками.

Норма цетанового числа стандартных дизельных топлив – не менее 45. Для современных практически применяемых топлив оно находится в пределах 45-50. Топлива с высоким цетановым числом имеют низкое октановое число. Между ними экспериментально установлена связь: ЦЧ = 60-0,5 ОЧ; чем хуже детонационная стойкость топлива, тем лучше его самовоспламеняемость.

Летние сорта дизельных топлив обычно имеют цетановое число в диапазоне 47-50, зимнее 45-49 из-за ограничения содержания парафиновых углеводородов, отличающихся хорошей самовоспламеняемостью и плохими низкотемпературными свойствами. Трудно обеспечить цетановое число 45 и выше для арктического топлива, так как соответствующим низкозастывающим нефтяным фракциям свойственны цетановые числа около 40.

Цетановое число повышают на несколько пунктов введением присадок изопропилнитрата или циклогексилнитрата, но они ухудшают другие показатели качества топлива.

Уменьшение периода задержки самовоспламенения, соответствующее увеличению цетанового числа выше 50, оказывается вредным в экологическом плане: оно усиливает дымление дизелей. Это объясняется увеличением доли топлива, сгорающего по диффузионному физико-химическому механизму при впрыске большей части топлива в уже горящий факел после самовоспламене-

ния. Диффузионному горению углеводородов свойственно сажеобразование, которое отнюдь не связано с неполнотой сгорания (см. п. 2.4), а характерное для дизеля множество мелких очагов горения при отсутствии фронта пламени препятствует газификации образующегося дисперсного углерода [11].

**8.2.3. Вязкостно-температурные свойства.** Прецизионные устройства подачи топлива дизельных двигателей – плунжерные насос-форсунки нормально работают при кинематической вязкости топлива примерно от 3-х до 8-ми  $\text{мм}^2/\text{с}$ . Такую вязкость дизельные топлива различного сезонно-климатического назначения должны иметь в рабочем диапазоне температуры топлива. При меньшей вязкости из-за высокого давления (порядка 10 МПа) топливо пробивается через зазор между плунжером и втулкой, из-за утечки топлива уменьшается производительность насоса. При большей вязкости ухудшается распыл топлива, уменьшается полнота сгорания, возрастает удельный расход топлива, усиливается дымление. Кроме того увеличивается сопротивление подаче топлива и уменьшается наполнение насосов вплоть до перебоев в работе.

Исходя из вязкостно-температурных характеристик дизельных топлив (рис. 8.6) и установленной стандартом их вязкости при  $20^\circ\text{C}$  определяется диапазон температур, в котором работоспособно топливо каждого сорта. Летнее дизельное топливо может быть использовано при температурах от  $0^\circ\text{C}$  до максимальных реальных температур окружающего воздуха. Зимнее работоспособно от минус  $20\text{--}30^\circ\text{C}$  (в зависимости от температуры застывания) примерно до  $0^\circ\text{C}$ . Арктическое дизельное топливо позволяет запустить дизель до температуры минус  $50^\circ\text{C}$  и обеспечить его нормальную работу приблизительно до минус  $10^\circ\text{C}$ .

**8.2.4. Сорта дизельных топлив.** Маркировка дизельных топлив, вырабатываемых по ГОСТ 305-82, производится буквой, обозначающей сезонно-климатические условия их применения, Л – летнее, З – зимнее, А – арктическое, и двумя цифрами, первая из которых указывает верхний предел допустимого содержания серы, а вторая для летних топлив – нижний предел температуры вспышки в закрытом тигле и для зимних топлив – верхний предел температуры застывания. В марке арктического топлива указано только предельное содержание серы.

Основными сортами дизельных топлив для наземной техники являются Л-0,5-40, З-0,5 минус 35, З-0,5-45, А-0,4. Они предназначены для двигателей ряда автомобилей, гусеничных тягачей и транспортеров. Эти топлива получают в основном смешением прямогонных и гидроочищенных нефтяных фракций.

Кроме стандартных дизельных топлив вырабатываются дизельные топлива по ТУ.

*Зимнее дизельное топливо с депрессорной присадкой ДЗп* получают на базе летнего дизельного топлива с температурой помутнения  $-5^\circ\text{C}$  путем введения сотых долей присадки. Присадка препятствует сращиванию мельчайших кристаллов парафинов и позволяет использовать летнее топливо в зимний период до температуры фильтруемости  $-15^\circ\text{C}$ . температура застывания при этом снижается до  $-30^\circ\text{C}$ .

Для применения в районах с холодным климатом на базе зимнего топлива с температурой помутнения  $-15^\circ\text{C}$  получают топливо ДЗп –15/–25 с температу-

рой фильтруемости  $-25^{\circ}\text{C}$ . На базе зимнего топлива с температурой помутнения  $-35^{\circ}\text{C}$  получают дизельное арктическое топливо ДАп  $-35/-45$  с температурой фильтруемости  $-45^{\circ}\text{C}$ .

*Экологически чистое дизельное топливо марок ДЛЭЧ-В и ДЛЭЧ (летние) и ДЗЭЧ (зимнее)* получают путем гидроочистки и ограничения содержания ароматических углеводородов. Содержание серы в топливе вида I до 0,05 %, вида II – до 0,1%. Содержание ароматических углеводородов в топливе ДЛЭЧ-В не более 20%, в топливе ДЗЭЧ – не более 10%.

*Городское дизельное топливо* предназначено для использования в г. Москве. Улучшение качества по отношению к экологически чистым топливом достигается путем использования антидымной присадки. Зимой используется также депрессорная присадка. Дымность и токсичность отработавших газов дизелей снижается на 30-40%.

**8.2.5. Стабильность дизельных топлив.** При хранении дизельные топлива стабильны. В любых климатических условиях при соблюдении установленных элементарных правил хранения качественные показатели дизельного топлива не входят за пределы норм примерно в течение пяти лет. Наблюдается лишь увеличение кислотности.

### **8.3. СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА АВИАЦИОННЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**8.3.1. Система смазки.** Поскольку масла авиационных поршневых двигателей используются главным образом легкомоторной авиацией, а также при эксплуатации самолетов устаревших типов масштабы их производства ограничены. Но проблемы их качества решены на высоком научно-техническом уровне в тот период, когда поршневые двигатели были в авиации основными.

Авиационные поршневые двигатели имеют сложную систему смазки, условия работы масла в них тяжелые. Масло в двигателе циркулирует под давлением до 1МПа, основная часть его идет на смазку большой площади высоконагруженных узлов *трения скольжения*, достигающей  $1\text{м}^2$ . Смазка цилиндропоршневой группы производится путем подвода масла к верхним головкам шатунов, а также разбрызгивания. Некоторое количество масла неизбежно проникает в камеру сгорания и выгорает. Чтобы обеспечить жидкостное трение (образование масляного клина) и уплотнение зазора между поршнями и цилиндрами, препятствующее протеканию продуктов сгорания в картер, масло должно иметь высокую вязкость в условиях высокой рабочей температуры – не ниже  $20\text{мм}^2/\text{с}$  при  $100^{\circ}\text{C}$ .

**8.3.2. Значение вязкости.** При недостаточной вязкости жидкий слой масла не может удержаться в зазорах и в результате усиливается износ деталей, ухудшается уплотнение поршневых колец, падают компрессия и мощность двигателя, происходят прорыв газов в картер двигателя и загрязнение масла, следствием чего являются усиленная коррозия подшипников и интенсивное осадкообразование. Чрезмерно жидкое масло забрасывается при движении поршней в цилиндры, в результате чего повышается расход масла, увеличивается нагарообразование, замасливаются свечи и происходят перебои в зажига-

нии, возникает детонация и разрушается поверхность поршня и других деталей камеры сгорания.

Однако слишком высокая вязкость масла также нежелательна, так как она приводит к увеличению сил трения, особенно при низких температурах, в результате чего возрастают потери мощности на прокачку масла и на трение при режимной работе. Затрудняется запуск двигателя, уменьшается прокачка масла через сеть каналов маслосистемы, ухудшается разбрызгивание масла, возникает масляное голодание: свежее масло к узлам трения не поступает, а находящееся в них масло разогревается от трения и вытекает. Результатом, как и при слишком низкой вязкости, является повышенный износ или даже заедание и задиры трущихся деталей.

Масло для поршневых двигателей должно иметь высокую смазочную способность, граничная пленка масла должна защищать узлы двигателя от сухого трения при запуске и остановке. Кроме того, она должна обеспечивать надежную работу шестерен редуктора и других силовых передач, где нет условий для образования жидкостного масляного клина. Частично это обеспечивается высокой вязкостью, которая способствует образованию толстого поверхностного слоя масла, однако в составе масла должны быть поверхностноактивные соединения – носители смазочной способности.

**8.3.3. Требования к стабильности.** В связи с высоким температурным режимом в зоне поршневой группы ( $200-300^{\circ}\text{C}$ ), контактом с горячим газом и воздухом при работе двигателя создаются условия для интенсивного лакообразования. Набивающиеся в канавки поршней лакообразные вещества могут схватить поршневые кольца и даже заклинить их, в результате чего произойдет поломка колец, задиры зеркала цилиндра и выход двигателя из строя. В связи с этим необходима достаточно глубокая очистка масла от склонных к лакообразованию нестабильных органических соединений, что ухудшает смазочную способность масла. Необходимость глубокой очистки связана также с тем, что материал подшипников поршневых двигателей – свинцовистая бронза – отличается значительным каталитическим действием, усиливающим процесс окисления масла, в том числе образования коррозионноактивных веществ. В то же время свинцовистая бронза нестойка против коррозии и чрезвычайно чувствительна к загрязнению масла.

**8.3.4. Сорта масел.** На всех авиационных поршневых двигателях в настоящее время применяется только один сорт масла из малосернистых нефтей МС-20 (цифрой обозначен нижний предел вязкости при  $100^{\circ}\text{C}$ ). Это остаточное масло высокой степени очистки. В остаточных продуктах вакуумной перегонки мазута гораздо больше полярных веществ – носителей смазочной способности, чем в дистиллятных. Наименее устойчивые из них удаляют при очистке масла. Таким образом, в какой-то мере разрешается противоречие между трудно совместимыми требованиями хорошей смазочной способности и термоокислительной стабильности.

Ранее вырабатывалось еще два сорта – МК-22 и МС-20С. При работе двигателей все три сорта масла, как показал опыт, практически равноценны. Ввиду этого при дозаправках самолетов их смешивали в любых соотношениях. Сера, содержащаяся в масле МС-20С в количестве до 1%, входит в состав неактивных



соединений и не оказывает вредного влияния на двигатели. Те отличия в физико-химических свойствах, которые имеются между этими маслами (по температуре застывания, кислотному числу, коксуемости и т. д.), в процессе работы двигателей практически выравниваются.

В связи с сокращением парка самолетов с поршневыми двигателями производство масла МК-22 и МС-20С прекращено. Единый сорт масла МС-20 используется так же для приготовления маслосмесей (п.7.5.) и для смазки шарниров винтов вертолетов.

**8.3.5. Пусковые свойства.** Масло МС-20 имеет неудовлетворительные низкотемпературные свойства: зимой застывает при  $-18^{\circ}\text{C}$  из-за резкого повышения вязкости с понижением температуры. Поэтому присадки-депрессоры не могут снизить его температуру застывания.

В зимнее время перед остановкой авиационного поршневого двигателя для обеспечения последующего его запуска масло ожижают бензином (в количестве 10% емкости маслосистемы). В результате разжижения температура застывания масла понижается примерно на  $10^{\circ}\text{C}$ , запуск двигателя оказывается возможным до температуры минус  $25-30^{\circ}\text{C}$ . Разжижение обеспечивает поступление жидкой подвижной смазки ко всем трущимся деталям и облегчает раскрутку вала двигателя стартером. После запуска двигателя бензин из разжиженного масла испаряется, и высокая вязкость масла постепенно восстанавливается. В масле остается лишь 2-3% бензина; такое количество топлива в масле бывает и без искусственного разжижения в результате проникновения его из цилиндров двигателя.

При температуре ниже минус  $25-30^{\circ}\text{C}$  масло после полетов из маслосистемы сливают, а перед запуском нагревают до  $90-100^{\circ}\text{C}$  и заливают вновь. Перед заливкой горячего масла в маслосистему двигатель подогревают с помощью аэродромных средств.

**8.3.6. Срок службы.** Свойства свежего масла в первые часы работы двигателя после заправки маслосистемы резко изменяются. Из-за накопления продуктов окисления и разложения быстро возрастают кислотное число и коксуемость. В масле появляются механические примеси – пыль, частицы износа. Вместе с окислами свинца, попадающими из топлива, они вызывают увеличение зольности. Изменяется также вязкость и другие показатели. В дальнейшем эти изменения происходят менее резко (рис. 7.4.) за счет долива масла и за счет стабилизации масла, работающего в двигателе. Стабилизации способствует фильтрация масла, центрифугирование его внутри коленчатого вала двигателя, а также образование в процессе окисления масла фенольных соединений, которые тормозят дальнейшее окисление.

Масла с физико-химическими показателями, получающимися после их стабилизации через несколько десятков часов, т. е. с возросшей во много раз коксуемостью, зольностью и т. д., вполне обеспечивают нормальную работу двигателя. Поэтому нет необходимости в частой замене масла.

**8.3.7. Зарубежные сорта.** Многие зарубежные нефтяные масла для авиационных поршневых двигателей имеют сходные свойства с отечественными маслами, в частности, американские масла сортов 1065, 1080 и 1100, соответст-

вующее последней марке английское масло Oil-100 или В/О (международное обозначение OM-270). Кроме того, применяется более вязкое масло для тропических условий (вязкость при 99°С в пределах 25-28мм<sup>2</sup>/с) под маркой Oil-120 или сорт С (международное обозначение OM-370).

#### **8.4. МОТОРНЫЕ МАСЛА НАЗЕМНОЙ ТЕХНИКИ**

**8.4.1. Назначение моторных масел и условия их работы в двигателях.** Моторными называют масла, применяемые для смазывания поршневых двигателей внутреннего сгорания наземной техники, а также судовых двигателей. В зависимости от назначения их подразделяют на масла для бензиновых двигателей, дизельные и универсальные моторные масла, которые предназначены для двигателей обоих типов. Все современные моторные масла состоят из базовых масел и улучшающих их свойства присадок. По сезонно-климатическими условиям применения моторные масла подразделяют на летние, зимние и всесезонные. Всесезонные масла состоят из маловязкой основы, загущенной полимерными присадками.

Моторное масло длительно подвергается в смазочной системе двигателя и на поверхностях смазываемых и охлаждаемых деталей термическим, механическим и химическим воздействиям.

Поршневые двигатели наземной техники имеют комбинированную систему смазки. К подшипникам коленчатого и распределительного валов масло поступает под давлением 0,15-0,4МПа, в остальные узлы трения масло попадает в результате разбрызгивания и вовлекается в зазоры движением трущихся деталей. Чтобы масло могло разбрызгиваться, его вязкость не должна быть высокой. Температурный режим маслосистемы большей части двигателей наземной техники ниже, чем авиационных (у форсированных дизелей с наддувом примерно такая же как у авиационных). Температура масла в картере 40-90°С, в подшипниках оно нагревается примерно до 100°С, а в зазоре между поршнями и цилиндром еще выше, что создает условия для лакообразования.

Условия трения, изнашивания и режим смазки различных узлов и деталей существенно различны. Подшипники коленчатого вала, поршневые кольца в сопряжении с цилиндром работают преимущественно в условиях гидродинамической смазки. Зубчатые колеса привода агрегатов, масляных насосов и детали механизма привода клапанов работают в условиях эластогидродинамической смазки. Вблизи мертвых точек жидкостное трение поршневых колец по стенке цилиндра переходит в граничное.

Нагрузки в узлах трения, как правило ниже, чем в авиационных поршневых двигателях. Поэтому средневязкие масла (5-15 мм<sup>2</sup>/с при 100°С) достаточны для обеспечения, где это необходимо, жидкостного характера трения на рабочих режимах.

Подшипники большинства бензиновых двигателей из мягкого антифрикционного материала – баббита, стойкого в отношении коррозии. Баббитовые подшипники изнашиваются, но не разрушаются при попадании на их поверхность имеющих в масле загрязнений; наиболее твердые из частиц вдавливаются в металл. Более нагруженные подшипники дизелей изготовлены, как правило, из твердых антифрикционных сплавов – свинцовистой или никелевой

бронзы и др. Эти сплавы не отличаются высокой стойкостью против коррозии и чувствительны к загрязнениям.

Коррозионная активность масла в поршневых двигателях может быть обусловлена наличием серы в топливе. Из цилиндра, особенно на изношенных двигателях, в картер попадает значительное количество газообразных продуктов сгорания топлива, в том числе пары воды и диоксид серы (сернистый газ) – продукт сгорания сернистых топлив. Сернистый газ окисляется и соединяется с водой, образуя в масле некоторое количество серной кислоты.

Конденсация воды в масле стимулирует образование густых осадков в картере. Количество осадков в двигателях наземной техники из-за более низкого температурного режима оказывается значительно большим, чем в авиационных. Этому способствует также значительное попадание пыли в масло.

Ввиду огромного количества автомобилей, тракторов и спецмашин в народном хозяйстве и Вооруженных Силах масла для них вырабатывают в большом количестве из доступного массового сырья. Однако дешевые натуральные нефтяные масла, как дистиллятные, так и остаточные, в сложных условиях работы в двигателях не обеспечивают их длительной надежности. Чтобы ее достигнуть, к моторным маслам добавляют присадки, точнее пакет присадок: многофункциональные присадки, уменьшающие нагаро-, лако- и осадкообразование, понижающие коррозионную активность, улучшающие смазочную способность; вязкостную присадку, с помощью которой из маловязких нефтепродуктов получают всесезонные загущенные масла с пологой вязкостно-температурной характеристикой; депрессор, понижающий температуру застывания; антипенную присадку и др.[24].

**8.4.2. Свойства моторных масел.** *Вязкостно-температурные свойства* определяют диапазон температуры окружающей среды, в котором обеспечивается пуск двигателя без предварительного подогрева, прокачивание масла по системе смазки, надежное смазывание и охлаждение деталей двигателя на рабочем режиме при максимальной температуре окружающей среды. Даже в умеренных климатических условиях диапазон изменения температуры масла от минимальной, обеспечивающей холодный пуск зимой, до максимальной, которую достигает масло в подшипниках коленчатого вала или в зоне поршневых колец, достигает 180-190 °С. Вязкость минеральных масел в интервале температур от –30 до +150 °С изменяется в тысячи раз. Летние масла, имеющие достаточную вязкость при высокой температуре, обеспечивают пуск двигателя при температуре окружающей среды около 0°С. Зимние масла, обеспечивающие холодный пуск при отрицательных температурах, имеют недостаточную вязкость при высокой температуре. Таким образом, сезонные масла независимо от их наработки необходимо менять дважды в год. Это усложняет и удорожает эксплуатацию двигателей.

Проблема решена созданием всесезонных масел, загущенных полимерными присадками - полиметакрилатами, сополимерами олефинов, полиизобутиленом (см. принципиальную схему получения загущенного масла на рис.7.3). При отрицательных температурах они подобны зимним, а в области высоких температур – летним. Вязкостные присадки незначительно повышают вязкость базового

масла при низкой температуре, но значительно увеличивают ее при высокой температуре.

В отличие от сезонных, загущенные всесезонные масла изменяют вязкость не только под влиянием температуры, но и по скорости сдвига: с увеличением частоты вращения вязкость снижается. Это облегчает пуск холодного двигателя, уменьшает потери энергии на трение и дает до 5% экономии топлива при режимной работе.

*Моюще-диспергирующие свойства* масла обеспечивают чистоту деталей двигателя, удерживая нерастворимые продукты окисления и загрязнения во взвешенном состоянии без выпадения в осадок, перехода в лакообразные отложения и нагар на горячих деталях.

В качестве моющих присадок используют сульфонаты, фосфонаты, органические соединения кальция или магния. Механизм их действия заключается в адсорбции на поверхности частиц, нерастворимых в масле. На каждой частице образуется оболочка из полярных молекул присадки. Возникающий двойной электрический слой придает частицам, на которых они адсорбировались, одноименный заряд препятствующий коагуляции частиц, они отталкиваются друг от друга.

Недостаток металлосодержащих моющих присадок – они повышают зольность масла. Это может привести к образованию зольных отложений в камере сгорания, замыканию электродов свечей зажигания, преждевременному воспламенению рабочей смеси, прогару выпускных клапанов, снижению детонационной стойкости топлива, абразивному изнашиванию.

*Антиокислительные свойства* определяют стойкость масла к старению. Жесткие условия работы моторных масел в двигателях достаточно не позволяет полностью предотвратить их окисление, приводящее к росту вязкости и коррозионности, склонности к образованию отложений, загрязнению масляных фильтров, затруднению холодного пуска, ухудшению прокачиваемости масла. Стойкость моторных масел к окислению повышают введением в их состав антиокислительных присадок. Наилучший антиокислительный эффект достигается при введении в масло присадок, обладающих различным механизмом действия. В качестве антиокислительных присадок к моторным маслам применяют диалкил- и диарилдитиофосфаты цинка, которые улучшают также антикоррозионные и противоизносные свойства, беззольные дитиофосфаты, ароматические амины. Антиокислителями также являются некоторые моюще-диспергирующие присадки. При длительной работе масла в двигателе интенсивный рост вязкости, обусловленный окислением, начинается после практически полного истощения антиокислительных присадок.

*Противоизносные свойства* моторного масла зависят от химического состава и полярности базового масла, состава присадок, вязкостно-температурной характеристики масла, зависимости вязкости от давления, свойств граничных слоев и способности химически модифицировать поверхностные слои сопряженных трущихся деталей.

Тенденция к применению маловязких масел для достижения экономии топлива и ограничение поступления масла к верхней части цилиндра для уменьшения расхода на угар требуют улучшения противоизносных свойств масел при граничной смазке. Это достигается введением противоизносных присадок,



содержащих серу, фосфор, галогены, бор, а также введением беззольных дисперсантов, содержащих противоизносные фрагменты.

*Антикоррозионные свойства* моторных масел зависят от эффективности антикоррозионных, антиокислительных присадок и деактиваторов металлов. В процессе старения коррозионность моторных масел возрастает. Более склонны к увеличению коррозионности масла из малосернистых нефтей с высоким содержанием парафиновых углеводородов, образующих в процессах окисления агрессивные органические кислоты, которые взаимодействуют с цветными металлами и их сплавами. Антикоррозионные присадки защищают антифрикционные материалы (свинцовистую бронзу), образуя на их поверхности прочную защитную пленку. Антиокислители препятствуют образованию агрессивных кислот. Иногда необходимо вводить в моторные масла присадки-деактиваторы, образующие с медью соединения, которые предохраняют поверхность от коррозионного разрушения.

*Температура застывания*, при которой масло теряет текучесть, на 5-7 °С ниже той температуры, при которой масло прокачивается через систему смазки. В большинстве случаев застывание моторных масел обусловлено образованием в объеме охлаждаемого масла кристаллов парафинов. Требуемая температура застывания при производстве масел достигается депарафинизацией базовых компонентов и введением в состав моторного масла депрессорных присадок, препятствующих сращиванию кристаллов парафинов.

**8.4.5. Маркировка моторных масел.** Моторные масла маркируют по классу вязкости и обозначению группы масел по назначению и уровню эксплуатационных свойств.

Марка масла начинается с буквы М, указывающей, что масло *моторное*. Следующая за ней одна цифра указывает *класс вязкости* сезонного масла, а дробью для всесезонного масла указывают *два класса вязкости* – числителем для зимы, знаменателем для лета. Индексом “з” у первой (или единственной) цифры помечены загущенные масла. Далее одной или двумя буквами обозначены группы по уровню эксплуатационных свойств и назначению, к которым относится данное масло. Буквой без индекса или двумя буквами с разными индексами обозначают универсальные масла, индексом 1 – масла для бензиновых двигателей, индексом 2 – масла для дизелей.

Примеры. Марка М-6<sub>з</sub>/10-В указывает, что моторное масло всесезонное и соответствует зимой классу вязкости 6, а летом классу 10, масло загущенное, универсальное (одна буква без индекса), предназначена для среднефорсированных дизелей и бензиновых двигателей (группа В). Марка М-14-Г<sub>2</sub> – моторное масло класса вязкости 14, предназначенное для высокофорсированных дизелей без наддува или с умеренным наддувом. Марка М-14-Д – моторное масло для высокофорсированных дизелей с наддувом, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях.

**8.4.6. Сорта моторных масел.** На военной технике применяются восемь основных сортов моторных масел.

*Масло М-6з/10-В* получают на основе высококачественного компаундированного базового масла, загущенного вязкостной присадкой; содержит эффективную композицию других присадок. Применяют всесезонно в среднефорсированных бензиновых двигателях, работающих на бензине А-76, и безнаддувных дизелях. Это универсальное масло отличается повышенной работоспособностью. В бензиновых двигателях грузовых автомобилей пробег до замены масла составляет 18000 км, в дизелях – до 500 моточасов. Обеспечивает холодный пуск при  $-20-25^{\circ}\text{C}$ .

*Масло М-8-Г<sub>2</sub> и М-10-Г<sub>2</sub>* для высокофорсированных автотракторных дизелей с умеренным наддувом или без наддува. Обеспечивает холодный запуск автомобильных дизелей при  $-20^{\circ}\text{C}$ , тракторных дизелей при  $-5^{\circ}\text{C}$ .

*Масло М-16-В<sub>2</sub> (прежняя марка М-16ИХП-3)* для быстроходных дизелей транспортных машин с высокотемпературным режимом работы. Обеспечивает холодный пуск двигателей от температуры  $-5^{\circ}\text{C}$ . Содержит композицию присадок: многофункциональной, моющей, антиокислительной, депрессорной и антипенной.

*Масло М-8-Д и М-10-Д* для форсированных дизелей с турбонаддувом, устанавливаемых на тяжелых промышленных тракторах, бульдозерах, строительных машинах, автогрузовиках, трубоукладчиках, работающих в тяжелых условиях.

*Масло М-14-Г<sub>2</sub>* для форсированных транспортных быстроходных дизелей, всесезонное. Вырабатывается взамен масел МТ-16П и М-16-ИХП-3.

Все перечисленные масла представляют собой смесь дистиллятного и остаточного компонентов, вырабатываемых из сернистых нефтей, с композицией присадок.

*Масло М-14-Д* для форсированных дизелей с турбонаддувом, устанавливаемых на автомобилях, работающих в тяжелых условиях в местах с жарким продолжительным летом, бульдозерах, тяжелых промышленных тракторах.

### 8.4.3. Классификация моторных масел по вязкости [17]

Класс вязкости	Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при температуре	
	100°С	-18°С, не более
3 <sub>з</sub>	не менее 3,8	1250
4 <sub>з</sub>	не менее 4,1	2600
5 <sub>з</sub>	не менее 5,6	600
6 <sub>з</sub>	не менее 5,6	10400
6	от 5,6 до 7,0	-
8	от 7,0 до 9,3	-
10	от 9,3 до 11,5	-
12	от 11,5 до 12,5	-
14	от 12,5 до 14,5	-
16	от 14,5 до 16,3	-
20	от 16,3 до 21,9	-
24	от 21,9 до 26,1	-
3 <sub>з</sub> /8	от 7,0 до 9,3	1250
4 <sub>з</sub> /6	от 5,6 до 7,0	2600
4 <sub>з</sub> /8	от 7,0 до 9,3	2600
4 <sub>з</sub> /10	от 9,3 до 11,5	2600
5 <sub>з</sub> /10	от 9,3 до 11,5	6000
5 <sub>з</sub> /12	от 11,5 до 12,5	6000
5 <sub>з</sub> /14	от 12,5 до 14,5	6000
6 <sub>з</sub> /10	от 9,3 до 11,5	10400
6 <sub>з</sub> /14	от 12,5 до 14,5	10400
6 <sub>з</sub> /16	от 14,5 до 16,3	10400

#### 8.4.4. Группы моторных масел по назначению и эксплуатационным свойствам

Группа		Рекомендуемая область применения
А		Нефорсированные бензиновые двигатели и дизели
Б	Б <sub>1</sub>	Малофорсированные бензиновые двигатели, работающие в условиях, которые способствуют образованию высокотемпературных отложений и коррозии подшипников
	Б <sub>2</sub>	Малофорсированные дизели
В	В <sub>1</sub>	Среднефорсированные бензиновые двигатели, работающие в условиях, которые способствуют окислению масла и образованию отложений всех видов
	В <sub>2</sub>	Среднефорсированные дизели, предъявляющие повышенные требования к антикоррозионным, противоизносным свойствам масел и способности предотвращать образование высокотемпературных отложений
Г	Г <sub>1</sub>	Высокофорсированные бензиновые двигатели, работающие в тяжелых эксплуатационных условиях, способствующих окислению масла, образованию отложений всех видов и коррозии
	Г <sub>2</sub>	Высокофорсированные дизели без наддува или с умеренным наддувом, работающие в эксплуатационных условиях, способствующих образованию высокотемпературных отложений
Д	Д <sub>1</sub>	Высокофорсированные бензиновые двигатели, работающие в эксплуатационных условиях, более тяжелых, чем для масел группы Г <sub>1</sub>
	Д <sub>2</sub>	Высокофорсированные дизели с наддувом, работающие в тяжелых эксплуатационных условиях или когда применяемое топливо требует использования масел с высокой нейтрализующей способностью, антикоррозионными и противоизносными свойствами, малой склонностью к образованию всех видов отложений
Е	Е <sub>1</sub>	Высокофорсированные бензиновые двигатели и дизели, работающие в эксплуатационных условиях более тяжелых, чем для масел групп Д <sub>1</sub> и Д <sub>2</sub> .
	Е <sub>2</sub>	Отличаются повышенной диспергирующей способностью, лучшими противоизносными свойствами



## Глава 9.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ МАСЛА И ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ

#### 9.1. ТРАНСМИССИОННЫЕ МАСЛА

**9.1.1 Условия работы.** В механизмах силовых передач с особо высокими нагрузками – редукторов трансмиссии хвостового винта, шарниров автомата перекоса несущего винта вертолетов, червячных механизмов рулевого привода самолетов и т. п. – условия работы масла иные, чем в двигателе. В каждый данный момент оно работает только на очень узком участке контакта в виде тонкой граничной пленки, адсорбированной поверхностью. На наиболее нагруженных участках пленка частично разрушается.

Необходимая в этих условиях особо высокая смазочная способность и противозадирные свойства могут быть обеспечены применением осерненного нигрола (неочищенного остатка перегонки мазута), смолистого экстракта, извлекаемого при селективной очистке моторных масел, или же комплексом присадок на синтетической основе.

Температура масла вне зоны контакта обычно невысокая (порядка 50-60°C); площадь соприкосновения масла с кислородом воздуха невелика. Поэтому не возникает условий для сколько-нибудь интенсивных процессов окисления и разложения в объеме масла и коррозионного действия его на детали вне зоны контакта. Следовательно, к трансмиссионным маслам незачем предъявлять требования стабильности при высоких температурах и отсутствия коррозионноактивных веществ. Коррозионноактивные вещества внутри корпуса, где температура ниже 100°C, практически не действуют на металл, а в зоне контакта, при повышении температуры в результате трения до 150-200°C и выше разлагаются и вступают с металлом в реакцию, оказывая требуемое противозадирное действие.

**9.1.2. Сорты трансмиссионных масел.** Для смазки промежуточного и хвостового редукторов вертолетов (а на Ми-1 и главного редуктора) применяют *гипоидное масло ТСгип (ТМ-4-34)* – осерненную смесь нигрола (смолистого вязкого остатка перегонки нефти или мазута) и маловязкого масляного дистиллята, содержащее 1,5-3,5% серы, в том числе свободную серу. Оно надежно предотвращает задир и "схватывание" металла при высоких нагрузках (выше 2000 МПа), но износ при его применении значительный. Это объясняется его высокой вязкостью (20-30 мм<sup>2</sup>/с при 100°C): движение масла внутри корпуса редуктора недостаточно, шестерни плохо охлаждаются, из-за чего граничная смазочная пленка оказывается не очень прочной. Кроме того, вязкое гипоидное масло имеет не вполне удовлетворительные низкотемпературные свойства, оно работоспособно до -20°C. Зимой на вертолетах гипоидное масло разжижают маловязким низкозастывающим гидромаслом АМГ-10 в соотношении 2:1 (маслосмесь СМ-9). Ее применяют также на некоторых типах самолетов в червячных механизмах перестановки стабилизатора.

Близкой по свойствам к трансмиссионным маслам является жидкая трансмиссионная *смазка ЦИАТИМ-208*, применяемая в механизмах гидропривода и уборки шасси тяжелых самолетов.

Шарниры автомата перекося вертолетов смазываются при положительных температурах *маслом МС-20*. Возможность использования этого масла, получаемого из остаточной фракции мазута, в качестве трансмиссионного обусловлена значительным содержанием в нем ПАВ. При низких температурах в холодных районах применяется специальное *шарнирное масло ВНИИ НП-25* с вязкостью около  $10 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $100^\circ\text{C}$ , работоспособное в пределах температур от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Оно представляет собой сравнительно маловязкую (для данного класса масел) смесь диэфирного и нефтяного масел с противозадирными и антиокислительными присадками. По противозадирным свойствам оно лучше, чем масло МС-20.

## 9.2. МАСЛА УМЕРЕННО НАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

На самолетах и вертолетах в узлах трения, работающих в условиях невысоких удельных давлений, применяют масла для двигателей и специальные сорта нефтяных и синтетических масел, а также растительные и животные жиры.

*Веретенное масло АУ* используется в подвижных сочленениях шасси и некоторых узлах вооружения. Это высокоочищенное нефтяное масло с низкой температурой застывания (не выше  $-45^\circ\text{C}$ ), несколько более вязкое, чем масла ТРД ( $12\text{--}14 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $50^\circ\text{C}$ ).

*Масло МВС* используется для смазки манжет поршней-штоков и уплотнений цилиндров в исполнительных механизмах воздушных систем. Это типичное загущенное масло, приготовленное аналогично гидромаслу АМГ-10 (см. 10.1.3.), но с большим количеством вязкостной присадки – до 25%. Этим обеспечивается сочетание высокой вязкости ( $70\text{--}90 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $50^\circ\text{C}$ ) и хороших низкотемпературных свойств (температура застывания не выше  $-60^\circ\text{C}$ ).

Для смазки резиновых деталей, трущихся о металл, в воздушных системах используется *смазка №6* – полисилоксановая жидкость высокой вязкости ( $200\text{--}275 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $20^\circ\text{C}$ ). Только кремнийорганическое масло может при такой вязкости иметь хорошие низкотемпературные свойства – смазка №6 имеет температуру застывания ниже  $-70^\circ\text{C}$ , а при температуре  $-60^\circ\text{C}$  обладает значительно меньшей вязкостью, чем нефтяные и синтетические масла для двигателей (не более  $15000 \text{ мм}^2/\text{с}$ ). Она практически не испаряется при работе. Смазывая резину, смазка не оказывает на нее вредного воздействия, но на стали она не образует граничной смазочной пленки.

## 9.3. ПРИБОРНЫЕ МАСЛА

**9.3.1. Особенности смазки приборов.** Для уменьшения трения и износа и одновременно для защиты от коррозии разнообразных узлов радиотехнического и прицельного оборудования, высокооборотных гироскопических приборов и тахометров, электрических машин, турбохолодильников, фотооборудования, часовых механизмов, стрелочных приборов в кабинах и т. д. применяются масла на кремнийорганической, нефтяной и жировой основе. Они работают в широком диапазоне температуры от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+100^\circ\text{C}$  и выше. Значительных длительно действующих нагрузок трущиеся узлы приборов обычно не испытывают, но подвергаются вибрациям. Скорость движения деталей в некоторых приборах очень велика (например, частота вращения ротора гироскопа  $15000\text{--}30000$

в минуту). Перемещение деталей приборов (особенно – начало перемещения) ни в коем случае не должно тормозиться маслом, так как это может вызвать ошибки в показаниях и сигналах. В связи с этим приборные масла должны иметь невысокую вязкость (в том числе при низких температурах), обеспечивающую свободное перемещение трущихся деталей приборов, но достаточную для предотвращения утечки масла. Приборное масло должно обладать способностью адсорбироваться на тех своеобразных материалах, которые применяются в приборах, – редких и драгоценных металлах, твердых минералах, стекле. Оно должно быть очень чистым и химически пассивным по отношению к материалам приборов. Многие приборы смазываются только при их изготовлении и при ремонте, смазывать их в эксплуатации запрещается, чтобы не регулировать прибор и не внести в него грязь. В связи с длительным сроком работы приборных масел необходимо, чтобы они при нормальной температуре были химически весьма стабильны и практически не испарялись.

**9.3.2. Сорта приборных масел.** Важнейшая группа приборных масел – *масла ОКБ-122*, главной составной частью которых является этилполисилоксановая жидкость. Она имеет рекордно пологую вязкостно-температурную характеристику, стабильна, нелетуча. Для улучшения смазочных свойств к ней добавлены нефтяные масла – веретенное АУ или МС-14 (от 15 до 40%). Температура застывания масел ОКБ-122 –  $-70^{\circ}\text{C}$ . Они стойки против окисления. Температура вспышки этих масел (характеризующая их испаряемость) высокая – порядка  $160-170^{\circ}\text{C}$ . Наименьшую вязкость из этой группы масел имеют сорта ОКБ-122-3 и ОКБ-122-4 (от 11 до  $14\text{ мм}^2/\text{с}$  при  $50^{\circ}\text{C}$ ), более высокую – сорта ОКБ-122-5 и ОКБ-122-14 (порядка  $20\text{ мм}^2/\text{с}$ ), наибольшую – сорт ОКБ-122-16 (около  $25\text{ мм}^2/\text{с}$ ). Кремнийорганические масла могут взаимодействовать с медью и свинцом, поэтому они несовместимы с латунью и непригодны для некоторых устройств и приборов с ответственными деталями из латуни.

Из нефтяных масляных дистиллятов с вязкостью при  $50^{\circ}\text{C}$  около  $6\text{ мм}^2/\text{с}$  самой низкой температурой застывания (ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ ) отличается *масло МВП* из беспарафинистых нефтей. Несмотря на это, масло МВП при температуре примерно  $-40^{\circ}\text{C}$  уже практически неработоспособно в приборном оборудовании из-за возрастания вязкости. Благодаря весьма глубокой очистке оно не вызывает коррозии металлов даже при длительной работе, но не отличается хорошей смазочной способностью, так как при очистке из него удаляются вещества, являющиеся носителями этого свойства.

Часовые механизмы и некоторые узлы радиотехнического оборудования самолетов смазывают *костным маслом* (получаемым из копытного жира) и *часовым маслом МЦ-3*, представляющим смесь костного и маловязкого нефтяного масла с добавлением антиокислительной присадки. Для костного масла характерна способность удерживаться в миниатюрных узлах трения, не растекаясь и не испаряясь (температура вспышки выше  $300^{\circ}\text{C}$ ). Оно имеет низкий коэффициент трения граничного слоя.

Масло часовое низкотемпературное *МН-60* представляет собой смесь костного масла с диоктисебагинатом и фракцией вакуумной перегонки нефтяного масла. Оно работоспособно от  $-60$  до  $50^{\circ}\text{C}$ .

## 9.4. СОСТАВ И СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

**9.4.1. Природа пластичных смазок.** Пластичные смазки представляют собой микронеоднородную смесь жидких масел с твердыми загустителями, ограничивающими их текучесть. Они не растекаются под действием собственного веса и обычных инерционных сил, а при больших нагрузках текут подобно вязким жидкостям. Это позволяет использовать их в таких узлах трения, где жидкая смазка не удерживается или ее трудно подвести. Их применяют также для герметизации соединений в трубопроводах и клепаных швов, защиты открытых поверхностей деталей от загрязнения и коррозии.

В соответствии с назначением консистентные смазки обычно делят на *антифрикционные, уплотнительные, защитные* (консервационные). Однако их функции часто переплетаются: антифрикционные смазки одновременно защищают от коррозии и попадания загрязнений.

В качестве загустителей обычно применяются мыла, твердые углеводороды, а также органические и фторуглеродные полимеры, графит, дисульфид молибдена. Загуститель содержится в смазках в небольшом количестве (как правило, до 10-20%). Сросшиеся кристаллики загустителя образуют непрерывный, но рыхлый каркас смазки, обычно микроволокнистой структуры, в ячейках которого находится жидкое масло (рис.9.1). Действующие на огромной поверхности контакта двух фаз адсорбционные силы обеспечивают нераздельность, коллоидную стабильность смазок.

Консистентная смазка представляет собой гель. Внутренняя структура гелей придает им особые механические свойства, отличающиеся от свойств как твердых, так и жидких тел. Так, прочность гелей уменьшается при повторных нагружениях и зависит от времени отдыха после предыдущего нагружения. Это обусловлено разрушением связей и деформацией кристалликов загустителя (ср. на рис. 9.1 электронномикротографии смазки до и после механического воздействия).

Под действием усилий, превышающих предел прочности (рис. 9.2), гель течет, причем вязкость его уменьшается с ростом градиента скорости сдвига  $dv/dn$  из-за более глубокого разрушения каркаса и ослабления связи между частицами загустителя. При очень большом  $dv/dn$  связи разрушаются практически полностью, и гель превращается в золь (рис. 9.1 справа). Но после снятия нагрузки связи постепенно восстанавливаются.

Обратимое разрушение структуры геля с переходом в текучее состояние при механическом воздействии и последующее восстановление структуры называется *тиксотропией*.

Свойства консистентных смазок определяются главным образом загустителем и в меньшей мере маслом. Так, натриевое мыло обеспечивает смазке прочность и тугоплавкость, но растворяется в воде, вследствие чего натриевые смазки раскисают во влажной среде. Литиевое мыло по тугоплавкости уступает натриевому, но зато нерастворимо в воде. Наибольшую влагостойкость придают смазке углеводородные загустители (парафин, церезин), но они плавятся при низкой температуре.

От свойств масла зависит нижняя температурная граница работоспособности смазок (морозоустойчивость), но морозоустойчивые смазки, содержащие



маловязкие масла, под нагрузкой отделяют масло. Из-за испаряемости и недостаточной стабильности нефтяных масел содержащие их смазки непригодны в условиях высокой температуры, вакуума, агрессивных сред. В состав некоторых сортов консистентных смазок входят присадки – стабилизирующие структуру, антиокислительные, противоизносные и противозадирные, ингибиторы коррозии.

**9.4.2. Показатели качества пластичных смазок.** *Пределом прочности смазки называется максимальное напряжение сдвига, выше которого разрушается структурный каркас смазки* (рис.9.2). Его определяют с помощью пластометра с масляным прессом, воздействующим на столбик смазки. В обычном рабочем интервале температур оно в миллионы раз меньше, чем для конструкционных материалов. От предела прочности смазки зависит начальное усилие сдвига, например, начало вращения подшипника качения, а также ее способность удерживаться в смазываемом узле при воздействии инерционных сил.

При усилении, превышающем предел прочности, смазка течет и характеризуется вязкостью, которая зависит (как у геля) от градиента скорости сдвига и слабо зависит от температуры – в сотни и тысячи раз меньше, чем у масел, входящих в их состав. Это объясняется тем, что сопротивление течению смазки обусловлено в основном сцеплением частиц загустителя, слабее зависящего от температуры, чем вязкость исходного масла. От вязкостных свойств смазок зависит темп запуска при низких температурах, возможность подачи смазок к узлам трения по каналам.

*Густота* консистентных смазок, в какой-то мере отражающая их структурно-механические свойства, контролируется по *пенетрации* – глубине (в десятых долях миллиметра) погружения в смазку конуса пенетromетра. Чем мягче смазка, тем больше число пенетрации (у смазок для авиационной техники от 170 до 360).

*Теплостойкость* смазок контролируют по *температуре каплепадения*, при которой из смазки, нагреваемой в специальном приборе, выпадает первая капля. Пластичные смазки применяют при температуре не менее чем на 10-20°C ниже, чтобы избежать вытекания смазки из узла трения. Смазки с температурой каплепадения ниже 65°C считаются *низкоплавкими*, от 65 до 100°C – *среднеплавкими*, выше 100°C – *тугоплавкими*. Наиболее термостойкие смазки не имеют температуры каплепадения. Их загуститель – измельченный до размеров коллоидных частиц силикагель, дисульфид молибдена, графит не плавится до очень высоких температур. Верхняя температура применения таких смазок определяется термостойкостью входящего в них масла.

Срок надежного действия смазок в установленном для них диапазоне температур зависит от стабильности и защитных свойств смазок. *Стабильностью* смазки принято считать ее способность сохранять собственную структуру и состав, а *защитными свойствами* – способность предохранять поверхности, на которые она нанесена, от агрессивных агентов. Показателями стабильности и защитных свойств служат те изменения, которые происходят в смазке или защищаемых ею материалах при воздействии нагрузок, нагрева и охлаждения, вакуума, воды и ее паров, кислорода, радиации и т. п.

Коллоидная стабильность оценивается процентной долей отпрессованного жидкого масла и по *синерезису* (так называется явление расслоения в коллоидных системах) при свободном истечении масла через бумажный фильтр после интенсивного перемешивания подогретой смазки. Испаряемость выражают в процентах потери массы смазки в испарителе. Потеря части жидкой фазы и соответствующее обогащение загустителем уменьшают пластичность смазки и делают ее неработоспособной. Химическую стабильность смазки оценивают путем форсированного ее окисления при повышенной температуре. Окисляется главным образом жидкая фаза – масло.

Способность смазки защищать поверхность материала от атмосферных и других разрушающих агентов обусловлена как изолирующим, так и активным ее действием. Она зависит от характеристик стабильности, а также от влагостойкости и водонепроницаемости смазки, отсутствия в ней механических примесей и коррозионноактивных веществ, наличия нейтрализующих веществ и ингибиторов коррозии. Механические примеси при контакте с водой способствуют возникновению электрохимической коррозии, а металлические частицы могут играть роль катализатора окисления самой смазки. В антифрикционной смазке недопустимы частицы, способные царапать детали, так как смазка в процессе применения не фильтруется. Попавшая извне пыль адсорбирует и впитывает масло, слой смазки засыхает и отстает.

Прилипание смазки к поверхности металла (*адгезия*) обычно прочнее, чем внутренняя связь между частицами смазки. Однако сползание смазки с вертикальной поверхности может произойти при температуре примерно на 20°С ниже точки каплепадения. Это объясняется *пристенным синерезисом* – повышением концентрации жидкого масла в ультратонком слое смазки у стенки. Под действием веса смазки и адсорбционных сил поверхности вблизи стенки возникают деформации каркаса смазки, возрастают микрополости, появляются микротрещины. Они заполняются жидким маслом, по слою которого соскальзывает прилегающая извне смазка. Поэтому смазку не следует наносить слишком толстым слоем.

## **9.5 ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ**

**9.5.1. Антифрикционные смазки широкого применения.** Антифрикционные смазки служат для уменьшения трения и износа в узлах систем управления самолетов и вертолетов, механизмах уборки шасси, подшипниках колес, ряда агрегатов вооружения и спецоборудования, приборов. Из соображений удобства обслуживания в качестве единой смазки для большинства узлов трения самолетов и вертолетов (шарниров системы управления, силовых приводов, механизации крыла, редукторов электромеханизмов и др.) внедряется в эксплуатацию смазка нового поколения *Эра* (ВНИИ НП-286М). Ее основой является изопарафиновое масло ИПМ-10, загустителем – влагостойкое, термостойкое литиевое мыло (стеарат лития). Содержит антиокислительную, антикоррозионную и противоизносную присадки. Представляет собой однородную мягкую светло-коричневую мазь. Водостойка, морозоустойчива до температуры –60°С, имеет низкую испаряемость. Температура каплепадения не ниже 180°С, работоспособна до температур 120-150°С, совместима со смазкой ЦИАТИМ-201.

Допускает вдвое большие нагрузки, чем смазка ЦИАТИМ-201, вместо которой она принята в качестве основного сорта.

В течение многих лет *смазка ЦИАТИМ-201* использовалась в качестве универсального сорта. Она представляет собой продукт загущения маловязкого приборного масла МВП литиевым мылом и содержит антиокислительную и одновременно стабилизирующую присадку – дифениламин (0,3%). Цвет смазки от желтого до коричневого, температура каплепадения не ниже 175°C, диапазон рабочих температур от –60 до +140°C. Из тонкого слоя смазки (особенно на открытой поверхности) масло МВП испаряется, смазка высыхает, оставшаяся масса литиевого мыла не обеспечивает нормальной работы узлов трения. Из-за этого она непригодна для длительной работы при температуре выше 90°C. Защитные свойства смазки невысокие – смазка влагопроницаемая. В связи с низкой вязкостью масла МВП смазка ЦИАТИМ-201 при повышенной температуре и под давлением склонна к синерезису. Ее следует хранить в прохладном помещении в мелкой таре (обычная расфасовка по 850 г).

В тех узлах трения, где температурный режим или удельное давление выше, чем могут выдержать смазки Эра, ЦИАТИМ-201, применяют смазки повышенной теплостойкости или повышенной прочности граничной пленки. Для приборов и специального оборудования применяют смазки повышенной стабильности.

Для подшипников ступиц колес шасси ЛА, где температура при пробеге достигает 180-200°C, предназначена, смазка нового поколения *Сапфир* (ВНИИ НП-261). Состоит из смеси синтетических масел (углеводородного и полиэфирного), загущенных комплексным кальциевым мылом, и комплексам присадок. Мягкая мазь серо-черного цвета. Температура каплепадения не ниже 250°C. Работоспособна длительно до 200°C, кратковременно до 250°C. В отличие от смазки НК-50, вместо которой она принята в качестве основного сорта, смазка Сапфир негигроскопична, морозоустойчива. При замене смазки НК-50 на смазку Сапфир узлы трения следует тщательно очистить от старой смазки, так как они несовместимы. Срок службы смазки Сапфир примерно вдвое больше, чем смазки НК-50.

*Смазка НК-50* с температурой каплепадения не ниже 200°C, густая, черного цвета. Она состоит из вязкого остаточного авиационного масла МС-20, натриевого мыла (более теплостойкого, чем литиевое, но невлагостойкого) и 0,5% коллоидного графита. Чешуйки графита обеспечивают высокую прочность смазочной пленки и предохраняют от сухого трения при высоких нагрузках и температурах до 400°C. Смазку используют как средство против наклепа и пригорания в сильно нагруженных и нагретых шлицевых и резьбовых соединениях.

Смазка НК-50 при повышенной влажности набухает, размягчается и сползает с деталей, а при низких температурах затвердевает и скалывается. Поэтому зимой при температуре ниже –150С в подшипниках колес самолетов применяют более морозостойкую смесь смазок НК-50 и ЦИАТИМ-201 в соотношении 3: 1 (этот состав имеет наименьший предел прочности, ниже, чем чистая ЦИАТИМ-201).

**9.5.2. Антифрикционные смазки для узлов трения, работающих в сложных условиях.** В горячей зоне вблизи двигателей наиболее пригодна

*смазка ЦИАТИМ-221*, внешне напоминающая смазку ЦИАТИМ-201, но более мягкая. Она получается путем загущения этилполисилоксановой жидкости, выдерживающей температуру до 300°C, тугоплавким кальциевым комплексным мылом. В условиях еще более высоких температур и контакта с горячими газами может работать *смазка ПФМС-4с* – продукт загущения весьма стабильной против окисления полифенилметилсилоксановой жидкости графитом и пигментным загустителем. Испарение жидкой фазы при температуре выше 400°C не приводит к отказу в работе механизмов, не имеющих скоростных узлов трения – загуститель продолжает выполнять в них смазочные функции примерно до 500°C.

Для подшипников поворотных лопастей воздушного винта изменяемого шага, испытывающих высокие удельные давления, используется *смазка 1/13*, работоспособная до 100-110°C. Она состоит из нефтяного масла средней вязкости, загущенного кальциево-натриевым мылом, приготовленным на основе касторового масла, обеспечивающим прочное сцепление с металлом. По основному назначению это смазка для подшипников качения наземной техники.

В узлах крепления лопастей несущего винта вертолетов, где удельное давление еще выше, предназначена *смазка ЦИАТИМ-203*. Она обладает не только высокой прочностью граничной смазочной пленки, но и химической активностью, предохраняющей металл от задира. Загустителем смазки является литиевое мыло, приготовленное на основе осерненных нафтенных кислот (содержание серы не менее 0,2%). Кроме серы противозадирные свойства смазки обеспечивает присадка трифенилфосфата (0,5%).

Сильно нагруженные узлы, совершающие возвратно-поступательное движение, меньше изнашиваются при использовании *металлоплакирующих смазок*, содержащих металлическую пудру (ЦИАТИМ-201 и ЦИАТИМ-203 с добавкой 10% свинцового порошка) – смазки свинцель 01 и 02. Они наволакивают защитное покрытие и выбирают люфты, образующиеся в результате износа основного материала.

Для особо нагруженных узлов с контактными давлениями 150-250 МПа (стойки шасси тяжелых самолетов, зубчатых и винтовых передач) создана смазка нового поколения *Атланта* (ВНИИ НП-254). Она представляет собой смесь синтетических масел, загущенную литиевым мылом (стеарат и гидрооксистеарат лития), с добавкой графита и свинцового порошка. Отличается высокими противоизносными и противозадирными характеристиками. Работоспособна в диапазоне температур от –60 до 150°C. Выдерживает ударные нагрузки. Водостойка и механически стабильна. Цвет смазки темно-коричневый с фиолетовым оттенком.

**9.5.3. Приборные смазки.** Для авиационных приборов и специального оборудования предназначены *смазки ОКБ-122*. В их состав входят весьма стабильные при длительной работе низкозастывающие полисилоксановые масла ОКБ-122 и влагостойкие загустители – стеарат лития, другие негигроскопичные мыла и церезин. Они работоспособны при температуре –70°C и даже ниже, а верхний предел их рабочей температуры определяется термостойкостью загустителя: 140°C для сортов ОКБ-122-7 и ОКБ-122-7-5, 70°C



для сортов ОКБ-122-8 и ОКБ-122-12. Смазки ОКБ-122-7 и ОКБ-122-12 отличаются прочностью граничной пленки, их применяют для червячных и других нагруженных механизмов автоматики управления самолетом и электроприводов. Смазка ОКБ-122-7-5 с малым пределом прочности и низкой вязкостью идет на высокооборотные слабо нагруженные узлы гиromеханизмов Смазка ОКБ-122-8 используется в ряде узлов прицельного и радиотехнического оборудования и приборов. Для фотооборудования, автопилотов, компасов предназначена *смазка 2ЦПК*, состоящая из масла МВП и церезина с добавкой костного масла.

**9.5.4. Уплотнительные смазки.** Герметизация соединений и кранов топливной, масляной и гидравлической систем обеспечивается бензиностойкой уплотнительной *смазкой БУ*. Она состоит из окисленного касторового масла и цинкового мыла, приготовленного на касторовом масле, а также небольшого количества глицерина. Смазка эта не растворяется углеводородами и хорошо прилипает к металлу, низкоплавкая. Зимой она загустевает и перед нанесением ее разбавляют спиртом.

Соединения антиобледенительной системы и других устройств, в которых находятся спирт, глицерин или вода, уплотняются *смазкой МГС*. Она состоит из трансформаторного масла и бариевого мыла, не растворимого в воде и других полярных жидкостях. Смазка тугоплавкая, но имеет низкую коллоидную стабильность, нестойка к воздействию топлив и масел.

Резьбовые соединения и краны трубопроводов и арматуры, контактирующие с агрессивными компонентами, уплотняются и предохраняются от спекания *смазкой ЦИАТИМ-205*, состоящей из нефтяных масел высшей очистки и церезина (43-47%), белого цвета. Смазка относительно низкоплавкая. Отличается особой влагонепроницаемостью: при одинаковой толщине слоя пропускает примерно в сто раз меньше влаги, чем смазка ЦИАТИМ-201.

**9.5.5. Смазки для консервации.** Наружная консервация всех типов двигателей и других изделий производится нанесением подогретого до 30-50°C любого из трех смазочных материалов – *масла МС-20 с добавкой 20-25% присадки АКОР-1* (содержащей нитрит натрия), жидкой *смазки К-17* или расплавленной *смазки ПВК*. Активные консервационные материалы типа АКОР-1 и К-17 химически взаимодействуют с поверхностью металла, способствуя созданию на ней защитной пленки, а также нейтрализуют продукты окисления и разложения остатков топлива и масла.

Смазка К-17 (масло консервационное) – маслянистая темно-коричневая жидкость, состоит из смеси масел МС-20 и трансформаторного, загущенных влагостойким литиевым мылом (2%) и сульфонатом кальция (10%). В нее входят синтетический каучук (1%) для лучшего образования пленки и активная присадка ЦИАГИМ-339, содержащая соединения фенолов с серой и барием. Обеспечивает защиту от коррозии до 10 лет.

Углеводородные защитные смазки (*пушечная ПВК, пушечная УНЗ и технический вазелин*), получают сплавлением высоковязкого масла с твердыми углеводородами – парафином, церезином и т. п. (до 75%). Смазка ПВК содержит 1% присадки МНИ-1 (окисленного церезина), которая уменьшает влаго-

проницаемость и повышает примерно на 15°C температуру сползания. Пушечная смазка УНЗ, содержащая 0,02% натриевой щелочи, технический вазелин УН, а также загущенное церезином масло МС-20 считаются резервными консервационными материалами для авиационной техники.

## **9.6. ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ НАЗЕМНОЙ ТЕХНИКИ, ОБСЛУЖИВАЮЩЕЙ ПОЛЕТЫ**

**9.6.1. Основные сорта автотракторных смазок.** Важнейшие сорта современных пластичных смазок автотракторной техники и других технических средств, обслуживающих полеты, представляют собой продукты загущения нефтяных масел литиевыми мылами (стеаратом и гидрооксистеаратом лития). Они содержат добавки и присадки, улучшающие функциональные и эксплуатационные свойства смазок. Литиевые мыла и другие ингредиенты этих смазок обеспечивают им теплостойкость, водостойкость, механическую и коллоидную стабильность, консервационные и антикоррозионные свойства, а рациональный подбор масляной основы – низкую испаряемость и работоспособность при низких температурах.

*Литол-24* – основной сорт смазки для всех типов узлов трения: подшипников качения и скольжения, шарниров, зубчатых и иных передач, направляющих ходовой части, подвески рулевого управления, других силовых узлов. Работоспособна от –40 до 120-130°C. Цвет смазки от светло-желтого до коричневого.

Рабоче-консервационная смазка *Литол-24рк* по составу отличается от смазки Литол-24 наличием антикоррозионной присадки и несколько иным качеством других присадок. Ее рекомендуется применять для той техники, которая эксплуатируется с длительными перерывами, а также в условиях повышенной коррозионной агрессивности окружающей среды.

*ШРУС-4* – смазка для шарниров полноприводных автомобилей, различных других узлов трения. Содержит 10% дисульфида молибдена MoS<sub>2</sub>, который обеспечивает высокие противоизносные и противозадирные свойства.

*Смазка № 158* для подшипников качения автотракторного оборудования, игольчатых подшипников карданных шарниров. Загуститель – литиево-калиевое мыло касторового масла и канифоли. Для обеспечения высоких противоизносных и противозадирных свойств в него введена микрослоистая высокотемпературная присадка фталоцианин меди (синий пигмент, используемый в текстильном производстве). Работоспособна от –30 до 100°C. Вызывает сильное раздражение кожи рук, что требует соблюдения правил техники безопасности.

*Смазка Фиол-2у* предназначена для игольчатых подшипников карданного вала автомобилей и другой наземной техники. Работоспособна от –30 до 100°C.

Кроме литиевых смазок применяют бариевую смазку *ШРБ-4* шарниров передней подвески и наконечников тяг рулевого управления автомобиля, обладающую волокнистой текстурой. Комплексное бариевое мыло приготовлено на хлопковом масле, синтетических жирных кислотах, гидрооксистеариновой и уксусной кислотах. Смазку закладывают на весь срок службы.

**9.6.2. Дублирующие и резервные автотракторные смазки.** При отсутствии основных марок могут быть использованы широко применявшиеся на ус-

таревшей технике кальциевые смазки-солидолы и кальциево-натриевые смазки 1/13 (см. п.9.5.2) и автомобильная ЯНЗ-2.

*Солидол С* представляет собой средневязкое масло (обычно индустриальное), загущенное кальциевым мылом, которое приготовлено на основе синтетических жирных кислот, полученных путем окисления парафинов. *Солидол Ж* загущен кальциевым мылом жирных кислот, входящих в состав растительных и животных жиров. Он лучше синтетического по вязкостно-температурной характеристике, но при "отдыхе" после разрушения не восстанавливается.

В состав солидолов входит 1-3% воды, которая обеспечивает создание кристаллического мыльного скелета (кристаллогидратов мыла). Этим объясняется невысокая теплостойкость солидолов. При повышенных температурах в результате потери воды их мыльный скелет разрушается и в дальнейшем (после понижения температуры) не восстанавливается: солидол разлагается на жидкое мыло и рыхлый мыльный осадок.

Солидолы работоспособны в пределах температуры от  $-30$  до  $65^{\circ}\text{C}$  (в мощных механизмах от  $-65^{\circ}\text{C}$ ).

*Смазка ЯНЗ-2* представляет собой минеральное масло (индустриальное 12), загущенное натриево-кальциевым мылом, которое образуется путем омыления синтетических жирных кислот. Смазка ЯНЗ-2 имеет более высокий предел прочности, чем солидолы, более высокую температуру каплепадения (выше  $150^{\circ}\text{C}$ ), обладает хорошей подвижностью при деформации после разрушения скелета. Эта смазка может применяться вместо солидолов и смазки 1-13 для ответственных узлов трения: подшипников колес, водяного насоса и др.

Для смазывания рессорных листов, ходовой части тракторов применяется *графитная смазка УСсА* – универсальная среднеплавкая синтетическая активированная. Она готовится путем загущения нефтяного масла повышенной вязкости кальциевым мылом, выработанным на основе синтетических жирных кислот, и чешуйчатым графитом. В условиях высоких динамических нагрузок графит предотвращает сухое трение металла о металл (для подшипников качения смазка УСсА непригодна). При отсутствии этой смазки заменителем может быть смесь солидола с 10% графита. Перед смешиванием солидол нагревается, но не более чем до температуры  $60^{\circ}\text{C}$ , выше которой он начинает распадаться.

## Глава 10

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

#### 10.1. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ ГИДРОУСТРОЙСТВ

**10.1.1 Условия работы.** Гидропередачи, обеспечивающие управление летательным аппаратом и его силовой установкой, вооружением, радиотехническим оборудованием, подъемом и выпуском шасси, торможением колес, а также гидропневматические амортизаторы и гасители колебаний стоек шасси, рассчитаны, как правило, на применение единой всесезонной рабочей жидкости – *гидромасла*. В отдельных случаях в качестве рабочей жидкости попутно используются топлива и смазочные масла (главным образом в автоматике двигателя и воздушного винта).

Типичная схема гидросистемы самолета с указанием характерных условий работы ее узлов представлена на рис. 10.1 (из большого числа исполнительных механизмов в виде примера показана магистраль бустера стабилизатора). Гидромасло находится в сложных условиях: рабочее давление в гидросистеме 10-20 МПа, а при работе некоторых гидроагрегатов – до 25-40 МПа, температура жидкости от –600С на стоянке зимой в холодных районах, а вследствие аэродинамического нагрева в полете, трения, теплопередачи от двигателя до 150-2000С. В гидропневматических амортизаторах шасси при посадке некоторых самолетов давление достигает 100 МПа. При этом жидкость соприкасается с резко нагревающимся газом.

Чтобы предотвратить окисление и взрыв паров гидромасла, в амортизаторах и поршневых гидроаккумуляторах используется азот, но в гидробачке, наддуваемом от компрессора двигателя, над жидкостью обычно находится воздух, кислород которого в некотором количестве растворяется в ней. Гидромасло имеет большую относительную площадь контакта с металлическими стенками, резиной и прокладочными материалами, поскольку количество его невелико (от нескольких литров до нескольких десятков литров), а поверхность внутренних полостей, в особенности гидравлических магистралей, значительна (на некоторых типах самолетов длина магистралей достигает нескольких километров).

**10.1.2. Основные требования к гидромаслу.** Для обеспечения быстрого действия гидроустройств и работоспособности их в широком диапазоне температур гидромасло должно иметь невысокую вязкость, пологую вязкостно-температурную характеристику, высокую температуру кипения и низкую температуру застывания. Но для обеспечения плавной работы гидроагрегатов, предотвращения перетекания и потерь через уплотнения желательна высокая вязкость. Следовательно, выбор вязкости должен быть компромиссным.

Гидромасло должно быть термостабильным, не вызывать коррозии металлов, набухания и разрушения резиновых уплотнений, шлангов и т.д., иметь хорошую смазочную способность, так как служит смазочным материалом для трущихся деталей гидроустройств. Желательно, чтобы оно было негорючим, а его пары – взрывобезопасными.

На рис.10.1 перечислены свойства гидромасла, влияющие на работоспособность и эксплуатационную надежность гидрооборудования, и возможные последствия неудовлетворительного качества гидромасла.



**10.1.3. Гидромасло АМГ-10.** В гидроустройствах самолетов, скорость длительного полета которых не превышает  $M=2-2,5$ , и вертолетов применяется авиационное масло гидравлическое АМГ-10 (МГ-15Б), окрашенное в красный цвет. Оно получается путем загущения утяжеленной малопарафинистой керосиновой фракции, выкипающей в пределах  $200-300^{\circ}\text{C}$ , высокомолекулярным полимером виниполом – винил-н-бутиловым эфиром  $(\text{CH}_2\text{CHOC}_4\text{H}_9)_x$  подобно тому, как получают загущенные смазочные масла (рис. 10.2). Этим достигается вязкость  $10 \text{ мм}^2/\text{с}$  при температуре  $50^{\circ}\text{C}$  в сочетании с пологой вязкостно-температурной характеристикой и очень низкой температурой застывания (ниже  $-70^{\circ}\text{C}$ ), необходимыми для нормальной работы гидроустройств в широком диапазоне температур.

Смазочная способность гидромасла АМГ-10 достаточна для предотвращения износа гидроустройств. Для обеспечения стабильности в течение длительного срока службы (двух-трех лет) и меньшего влияния на резину из нефтяной основы гидромасла удалены непредельные и ароматические углеводороды и добавлена антиокислительная присадка – параоксидифениламин  $\text{C}_6\text{H}_5\text{NHC}_6\text{H}_4\text{OH}$ . Хотя шланги, уплотнения, манжеты гидроустройств выполнены из маслостойкой резины, при длительной работе (обычно более двух лет) из-за растворения резины в жидкости иногда появляются сгустки, приводящие к отказу гидроустройств. Поэтому необходимо регулярно контролировать качество гидромасла и по состоянию заменять его.

Вязкость гидромасла АМГ-10 при эксплуатации постепенно снижается из-за механодеструкции ("размола") вязкостной присадки. Это приводит к грубой работе механизмов, например, резкому срабатыванию тормозов и к утечке. Если вязкость стала ниже  $7 \text{ мм}^2/\text{с}$ , гидромасло заменяют независимо от срока службы. Разработано гидромасло АМГ-10Б, вязкостная присадка которого более стойка к механодеструкции. Его вязкость снижается в 3-4 раза медленнее.

Вследствие растворения влаги, попадающей из воздуха, контактирующего с жидкостью в гидробачке, в гидромасле может накопиться вода. Ее выделение и замерзание на фильтрах, в редукционных клапанах, золотниках вызовет отказы или задержки в работе гидроустройств, например, медленную реакцию тормозов. Отсутствие воды периодически контролируют в нижних точках гидросистем.

Серьезными недостатками гидромасла на нефтяной основе являются его огнеопасность и недостаточная для сверхзвуковых самолетов термостабильность. При повреждении гидросистемы и аварийном выбросе гидромасла на горячие детали двигателя возникает самовоспламенение и пожар. При боевых повреждениях в первую очередь, как правило, загорается гидромасло, а от возникшего очага пламени начинает гореть топливо и масло. Длительное воздействие высокой температуры (более  $120^{\circ}\text{C}$ ) вызывает появление твердого осадка (такого же, как в топливах). Попадание его в зазоры золотниковых и других регулирующих устройств может привести к отказу гидроприводов, в зазоры силовых узлов – к их преждевременному износу, а отложение на фильтрах – к замедлению работы гидромеханизмов. Во избежание осадкообразования замену гидромасла АМГ-10 на некоторых сверхзвуковых самолетах производят через 200 ч полета.

**10.1.4. Высокотемпературные жидкости.** В гидросистемах сверхзвуковых самолетов с числом  $M = 2,5$  применяется малогорючая гидравлическая жидкость 7-50с-3 на кремнийорганической (полисилоксановой) основе, работо-

способная до  $175^{\circ}\text{C}$  и кратковременно до  $200^{\circ}\text{C}$ . Она имеет очень низкую температуру застывания, отличные вязкостно-температурные свойства – полисилоксаны обладают самой пологой вязкостно-температурной характеристикой из всех органических жидкостей такой же вязкости.

Ввиду недостаточной смазочной способности кремнийорганической основы, которая может отразиться на сроке службы шестеренчатых насосов и других гидромеханизмов с высокими контактными давлениями, к ней добавляют термостабильное дизфирное масло с высокой смазочной способностью, несущественно ухудшающее вязкостно-температурную характеристику. Синтетическая жидкость 7-50с-3 может применяться в течение 250 ч полета (или 2,5 года) при рабочих температурах до  $175^{\circ}\text{C}$ , из них 30 ч до  $200^{\circ}\text{C}$ . Однако при температуре выше  $175^{\circ}\text{C}$  происходит изменение ее свойств и коррозия находящихся в контакте с ней меди, кадмия, фосфатных покрытий. Причиной коррозии является, главным образом, органическая кислота, образующаяся вследствие гидролиза дизфирной добавки, который происходит под действием растворенной воды.

Испаряется жидкость 7-50с-3 в несколько раз медленнее керосиновой основы гидромасла АМГ-10. Несмотря на отсутствие вязкостной присадки, слабая механическая деструкция жидкости 7-50с-3 все же происходит: "размолу" подвергается сама ее основа – кремнийорганический полимер. Фрагменты разрушенных молекул вновь полимеризуются, но случайным образом, и частично окисляются. Поэтому вязкость жидкости может как понижаться, так и повышаться.

Вязкость жидкости 7-50с-3 при температуре  $200^{\circ}\text{C}$  – не менее  $1,3\text{ мм}^2/\text{с}$ , при  $20^{\circ}\text{C}$  – не менее  $22\text{ мм}^2/\text{с}$ . Если при  $20^{\circ}\text{C}$  вязкость вышла за пределы  $19\text{--}26\text{ мм}^2/\text{с}$ , гидромасло заменяют досрочно. Замену производят также при снижении температуры вспышки до  $160^{\circ}\text{C}$  при норме  $180^{\circ}\text{C}$  и повышении кислотного числа до  $0,8\text{ мг КОН на }1\text{ г}$ .

Жидкость 7-50с-3 токсична. Опасны ее длительный контакт с кожей, попадание в желудочно-кишечный тракт, а при температурах более  $40^{\circ}\text{C}$  – вдыхание ее паров. Помещения, где с ней работают, снабжают вентиляцией с 10-кратным обменом воздуха в час. При попадании на кожу ее смывают теплой водой с мылом. Для защиты кожи рук применяют полиэтиленовые или резиновые перчатки либо мази ИЭР-1, ИЭР-2.

На некоторых самолетах гражданской авиации применяется фосфорорганическая практически негорючая жидкость НГЖ-4, фиолетового цвета. Она обладает хорошими низкотемпературными свойствами и пологой вязкостной температурной характеристикой, но несовместима с некоторыми неметаллическими материалами и ядовита.

**10.1.5. Автомобильная тормозная жидкость.** Рабочие жидкости гидропривода тормозов и сцепления автомобилей отличаются хорошими вязкостно-температурными и смазочными свойствами, стабильны в эксплуатации, не оказывают вредного воздействия на обычную (немаслостойкую) резину и металлы. Это обеспечивается их своеобразным составом – гликолиевой основой, вязкостной присадкой и комплексом функциональных присадок. Все гидромоторные жидкости ядовиты.

*Жидкость ГТЖ-22*, окрашенная в характерный зеленый цвет (ее естественный цвет светло-желтый), имеет вязкость около  $8\text{ мм}^2/\text{с}$  при  $50^{\circ}\text{C}$ , близкую к

вязкости масел МС-8с и МС-8рк, а при  $-40^{\circ}\text{C}$  примерно вдвое меньшую вязкость, чем эти масла. Температура замерзания жидкости не выше  $-65^{\circ}\text{C}$ . Представляет собой смесь диэтиленгликоля с этилцеллозольвом и присадки, улучшающей стойкость к окислению и противоизносные свойства. Однако ее смазочная способность все же недостаточна. Жидкость коррозионноактивна в отношении цветных металлов, гигроскопична (хранить ее нужно в герметичной таре).

*Жидкость ГТЖ-22М*, принятая в качестве основного сорта автомобильных тормозных жидкостей, содержит композицию присадок, улучшающих защитные и смазочные свойства. Работоспособна при температуре окружающего воздуха от  $-42$  до  $50^{\circ}\text{C}$ .

*Тормозная жидкость "Томь"* лучше по нейтральности к резине и металлам. Температурный диапазон ее применения от  $-50$  до  $50^{\circ}\text{C}$ . Состоит из моноэтилового эфира диэтиленгликоля, триалкилоксибора, загущающей полиэфирной присадки и композиции других присадок.

Применяемая в качестве резервной *тормозная жидкость БСК* (смесь 60% бутилового спирта и 40% касторового масла) обеспечивает плавную работу и незначительный износ гидротормозных систем. Ее серьезный недостаток: возможность неожиданного отказа тормозов при температуре около  $-10^{\circ}\text{C}$  из-за кристаллизации касторового масла (иногда работоспособна до  $-50^{\circ}\text{C}$ ).

## 10.2. АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫЕ ЖИДКОСТИ

**10.2.1. Условия работы и требования к свойствам.** Ледяная корка на поверхности самолета или вертолета образуется в результате контакта с переохлажденными водяными каплями, взвешенными в атмосфере, а также вследствие конденсации пара и образования инея при попадании сильно охлажденного самолета в зону теплого воздуха. На участки, обледенение которых представляет наибольшую опасность или идет наиболее интенсивно (остекление кабин, лопасти несущего винта вертолета), подается антиобледенительная жидкость. Она поступает на защищаемую поверхность через ряд отверстий в специально подведенных трубках, куда она подается электронасосом. Расход ее составляет несколько литров в час.

Главные требования к антиобледенительной жидкости – низкая температура замерзания в исходном состоянии и в смеси с водой, способность легко растворять лед и воду, хорошо смачивать поверхности металла и стекла, подвижность при низких температурах.

**10.2.2. Применяемые составы антиобледенительных жидкостей.** Для борьбы с обледенением остекления кабин используют *этиловый спирт ректификованный технический* крепости 95,5-96,0%. Его применяют прежде всего потому, что он прозрачный, бесцветный, отличается очень низкой температурой замерзания ( $-114^{\circ}\text{C}$ ). Смеси его с водой также не замерзают при достаточно низких температурах (рис. 10.3). Спирт хорошо смачивает металл и стекло, обеспечивая образование на них тонкой поверхностной пленки; хорошо растворяет лед; стабилен, не загрязняет стекол кабин. При контакте со льдом нагревает его вследствие выделения энергии гидратации. Следует иметь в виду, что вследствие гидратации при смешении спирта с водой объем уменьшается (кривая  $-\Delta V$  на рис. 10.3).

В целях экономии спирта при обучении пользованию антиоб-

леденительной системой (в условиях отсутствия обледенения) применяют спирто-водные смеси крепостью 30% (до  $-10^{\circ}\text{C}$ ) и 43% (до  $-25^{\circ}\text{C}$ ).

Недостатком этилового спирта как антиобледенительной жидкости, является коррозионная активность в отношении алюминия и цинка (образование студенистых алкоголятов), а также огнеопасность. Кроме того, спирт быстро испаряется с защищаемой поверхности и вследствие малой вязкости сдувается потоками воздуха.

Для защиты от обледенения несущего винта вертолетов применяют смесь 85% ректификованного спирта и 15% глицерина. Благодаря более высокой вязкости и медленному испарению она лучше удерживается на лопастях ротора вертолета. Температура замерзания этой жидкости не выше  $-70^{\circ}\text{C}$ . Однако глицерин, окисляясь, может "засахариваться", забивая отверстия трубок подачи.

Для защиты от обледенения воздушных винтов самолетов и вертолетов используют также эфиральдегидную фракцию (ЭАФ), являющуюся отходом производства этилового спирта. Она содержит примерно 90% этилового спирта, а 10% составляет смесь эфиров, альдегидов, сивушных масел, метилового спирта. Очень гигроскопична, ядовита.

**10.2.3. Защита от наземных льдообразований.** Удаление и профилактика наземных льдообразований (инея, примерзшего снега) производится опрыскиванием поверхности летательных аппаратов жидкостью "Арктика" (на основе этиленгликоля или диэтиленгликоля с добавкой воды и поверхностноактивных веществ). Жидкость эта малолетучая, не имеет запаха, огнеопасна, нейтральна к материалам (кроме коррозии магниевых сплавов), но ядовита при приеме внутрь и в распыленном виде. В зависимости от погоды действует от 0,5 до 24 часов. Жидкость "Арктика-200" отличается от жидкости "Арктика" большей вязкостью, она содержит загуститель, а также антикоррозионную присадку (динатрийфосфат).

При обработке летательных аппаратов нужно находиться с наветренной стороны, защищать лицо и руки. После работы обязателен душ.

### **10.3. ОХЛАЖДАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

**10.3.1. Охлаждающие жидкости.** В качестве охлаждающей жидкости для ряда систем и устройств, требующих непрерывного отвода тепла (маслорадиаторы, охлаждающие рубашки радиотехнической аппаратуры), попутно используется топливо. На некоторых типах сверхзвуковых самолетов в полет берется специальный запас охлаждающей жидкости для системы кондиционирования воздуха, поступающего в кабину. Поскольку сжатый воздух при отборе от компрессора двигателя имеет высокую температуру, перед поступлением в кабину его пропускают через турбохолодильник и змеевик испарителя. В испаритель впрыскивается охлаждающая жидкость: летом – дистиллированная вода, а зимой – низкотемпературная, смесь 50% или 40% этилового спирта соответственно с 50% или 60% дистиллированной воды. Целесообразность применения воды в таких системах обусловлена более высокой, чем у других жидкостей, теплотой ее парообразования. Предварительная дистилляция (перегонка) воды необходима из-за наличия в природной воде солей кальция, которые при испарении воды в самолетной системе дали бы отложения (накипь) на змеевике, снижающие теплопередачу.



Спирт и спирто-водные смеси применяются также для охлаждения самолетных колес при торможении, некоторых устройств электро- и радиооборудования.

Для нормальной работы водяной или водо-спиртовой охлаждающей системы на высоте в ней нужно создавать избыточное давление, так как на высоте более 19 км вода кипит при температуре ниже 40°C.

**10.3.2 Охлаждающие жидкости поршневых двигателей.** При работе автомобильных к тракторных двигателей 25-30% тепловой энергии, выделяемой при сгорании топлива, приходится отводить в охлаждающую жидкость, которая нагревается, омывая цилиндры двигателя, а затем в радиаторе отдает тепло проходящему через него потоку воздуха. Рабочая температура жидкости в системах охлаждения порядка 50-100°C, перепад температур на входе и выходе охлаждающей рубашки цилиндров – около 10-12°C.

Самой доступной и дешевой охлаждающей жидкостью поршневых двигателей является вода. Она имеет высокую теплоемкость и теплопроводность, но недостаточно высокую температуру кипения (практически ниже 100°C) и неудовлетворительную температуру замерзания 0°C. Замерзающая вода разрушает систему охлаждения, так как увеличивается в объеме примерно на 10%, и образующийся лед разрывает блоки цилиндров и радиаторы. Поэтому при отрицательной температуре воду необходимо сливать или же периодически запускать двигатель для прогрева воды.

В природной воде растворены соли, главным образом бикарбонаты кальция и магния, которые при температурах выше 60-70°C разлагаются и образуют на стенках нерастворимую накипь. Содержание в воде естественных растворенных солей называется *жесткостью* воды. Наиболее жесткой из источников пресной воды является ключевая и колодезная вода, среднюю жесткость имеет поверхностная вода (речная, вода несолёных озер), мягкой является атмосферная вода (дождевая, снеговая). Для использования в системах охлаждения двигателей жесткую воду умягчают различными способами – длительным кипячением, добавкой химических реагентов антинакипинов, использованием ионообменных фильтров.

В зимнее время для облегчения эксплуатации двигателей вместо воды применяют низкотемпературные смеси этиленгликоля с водой. Смесь 66,7% этиленгликоля и 33,3% воды образует эвтектику с температурой замерзания –75°C (рис. 103). Практически используются смеси, содержащие избыток воды (левая ветвь кривой), т.е. не более 66,7% гликоля. Это целесообразно как по экономическим, так и по эксплуатационным соображениям: выкипание воды по левой ветви ведет к понижению температуры замерзания смеси, а по правой - к повышению.

При охлаждении гликоле-водных смесей до температур, соответствующих началу кристаллизации, может начаться вымерзание воды. Однако кристаллы льда образуют с жидкостью кашицеобразную массу и не опасны в отношении разрыва или повреждения узлов, в полостях которых находится жидкость. Общее замерзание всей массы может произойти лишь при нереальной в эксплуатации температуре –70°C и ниже. Гликоле-водные смеси склонны к переохлаждению: при температурах, указанных на рис. 10.3, они могут не замерзнуть.

Применяют несколько сортов охлаждающих жидкостей, с исходными температурами замерзания минус 40 и минус 65 (при испарении воды в процессе эксплуатации температура замерзания снижается). Они различаются составом и количеством антикоррозионных присадок.

ОЖ-40 "Лена" и ОЖ-65 "Лена" предназначены для систем охлаждения двигателей автомобильной техники, а также для теплообменных аппаратов, работающих при низких и умеренных температурах, для специального и радиотехнического оборудования ЛА. Коррозионная агрессивность этих жидкостей по отношению к алюминию и чугуну меньше, чем у других охлаждающих жидкостей. Работоспособны, соответственно, от температур – 40 и – 60<sup>0</sup>С до 95<sup>0</sup>С, кратковременно до 105<sup>0</sup>С.

Тосол-А40М и Тосол-А65М по сроку службы уступают жидкостям "Лена" в 1,5-2 раза.

Низкозамерзающие охлаждающие жидкости марка 40 и марка 65 применяют на автомобилях и тракторах с 50-х г.г. прошлого века, марку 65 – в районах крайнего Севера.

Низкозамерзающие жидкости имеют особенности, которые нужно учитывать при хранении и применении. Этиленгликоль гигроскопичен, каждый литр его способен поглотить из атмосферы до 0,6 л воды. Поэтому при хранении жидкости марки 65 тара должна быть герметически укупорена. Гликолевые смеси имеют большой коэффициент теплового расширения. Вследствие этого в системе охлаждения при заправке следует оставлять незаполненным 5-6% объема в случае применения жидкости марки 40 и 6-8% объема – марки 65.

В процессе эксплуатации из гликоле-водной смеси испаряется практически только вода, так как температура кипения ее значительно ниже, чем гликоля (он кипит около 200<sup>0</sup>С). Поэтому в систему следует доливать, как правило, воду. Однако перед доливом желательно все же проверять состав и температуру замерзания оставшейся жидкости при помощи гидрометра, так как потери могут быть обусловлены выбросом избытка смеси при переполнении систем вследствие теплового расширения жидкости. В последнем случае необходимо доливать не воду, а смесь нужного состава.

Гликоле-водные смеси, несмотря на антикоррозионные присадки, все же вызывают коррозию металлов. Вследствие коррозии иногда возникает течь радиаторов; при зимней эксплуатации за ними должно вестись тщательное наблюдение. Особенно интенсивно гликоле-водные смеси, не содержащие молибдата натрия, корродируют цинк, поэтому их нельзя хранить в оцинкованной таре.

При хранении, заправке и применении гликоле-водных смесей нужно следить за тем, чтобы в них не попадали нефтепродукты. Примесь нефтепродуктов вызывает образование пены, ухудшение циркуляции жидкости и теплообмена, а иногда и выброс жидкости.

Гликоли и смеси их с водой ядовиты. При попадании внутрь организма они вызывают тяжелые отравления (иногда со смертельным исходом). Поэтому категорически запрещается засасывать их в шланг ртом; после работы с ними необходимо тщательно мыть руки.

## 10.4. ОГНЕГАСИТЕЛЬНЫЕ СОСТАВЫ

**10.4.1. Способы гашения пламени.** Противопожарные системы на самолетах и вертолетах состоят из бачка с огнегасящей жидкостью, магистралей и распылителей, через которые она выбрасывается для гашения пламени в отсеки двигателей, топливных баков и др. При зарядке бачка в нем создается необходимое для выброса давление газа.

Гашение очага пожара может быть обеспечено изоляцией его от доступа воздуха, разбавлением нейтральным газом до нижнего предела горючести (обеднением смеси), резким охлаждением, химическим вмешательством. Вода и диоксид углерода (сжиженный под давлением более 6 МПа) оказывают все перечисленные виды воздействия, за исключением химического. Однако огнегасящая концентрация диоксида углерода слишком велика (22% по объему в воздухе), чтобы необходимую массу его (вместе с противопожарным оборудованием) держать на борту ЛА. Гашение нефтяного топлива водой малоэффективно: оно разбрызгивается, способствуя распространению пожара, всплывает и продолжает гореть.

**10.4.2. Применяемые составы.** Наиболее подходящими огнегасительными агентами являются бромпроизводные углеводородов, выделяющие в очаге пожара атомарный бром. Он связывает горючие элементы, опережая кислород воздуха. Выделяемая при этом энергия во много раз меньше, чем при реакции с кислородом, поэтому температура факела падает и пламя гаснет. Существенную роль играет высокая плотность паров бромпроизводных углеводородов: они оседают в зоне очага пламени.

Наилучшей из применяемых огнегасительных жидкостей является фреон 114В<sub>2</sub> – тетрафтордибромэтан С<sub>2</sub>Ф<sub>4</sub>Вг<sub>2</sub>. Активным в его составе является бром, фтор остается связанным с углеродным скелетом. Фреон практически не замерзает (температура замерзания –110<sup>0</sup>С), кипит при 47<sup>0</sup>С, не оказывает коррозионного действия на материалы.

Ограниченно применяются составы "3,5" – смесь 70% бромистого этила С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>Вг с 30% жидкого диоксида углерода СО<sub>2</sub> и "7" – смесь 75% дибромэтана СН<sub>2</sub>Вг<sub>2</sub>, 19% бромистого этила С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>Вг и 6% жидкого диоксида углерода СО<sub>2</sub>. Маркировка цифрами "3,5" и "7" указывает, что их огнегасящая концентрация и, следовательно, расход в 3,5 раза и в 7 раз меньше, чем диоксида углерода, принятого за эталон. Недостатком этих составов является их коррозионная активность. Все бромпроизводные углеводородов, в том числе фреон 114В<sub>2</sub> токсичны. Они обладают еще одним серьезным недостатком: при длительном контакте с алюминием образуют пирофоры (самовоспламеняющиеся вещества) – триметилалюминий и триэтилалюминий, которые могут вызвать пожар.

Для гашения пожара в кабинах ЛА применяется газообразный фреон 12В<sub>1</sub> – дифторхлорбромметан СФ<sub>2</sub>СlВг (температура кипения –58<sup>0</sup>С). Он менее ядовит, чем фреон 114В<sub>2</sub>, но менее эффективен.

## Глава 11

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГСМ

#### 11.1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА И СЕРТИФИКАЦИЯ ГСМ

**11.1.1. Государственные стандарты качества ГСМ.** Для применения на каждом типе самолета, вертолета, агрегата, прибора допущены только те сорта ГСМ, годность которых проверена испытаниями и в условиях практического применения. Качество каждого сорта ГСМ, определяемое путем физико-химического анализа, должно соответствовать требованиям Государственного стандарта России (ГОСТ Р; связанные с военной проблематикой обозначаются ГОСТ Р В, а введенные до 1990г. обозначены аббревиатурой ГОСТ без дополнительных символов). Стандарт принимается по представлению заинтересованных организаций Государственным Комитетом России по стандартизации и метрологии. Несоблюдение стандартов предприятиями промышленности – поставщиками ГСМ преследуется по закону. Транспорт несет ответственность за сохранение стандартного качества ГСМ при перевозке, а потребители – при их применении, поскольку от этого зависят надежность и срок службы, боеготовность и некоторые тактико-технические данные авиационной техники.

Содержание ГОСТ является результатом научных исследований и согласования обоснованных испытаниями требований потребителей и изготовителей авиационной техники с производственными возможностями нефтеперерабатывающей и химической промышленности. Как правило, в стандарте указано, что данный сорт топлива или масла должен вырабатываться по такой же технологии и из тех же нефтей, компонентов, присадок, которые применялись при изготовлении образца, прошедшего государственные испытания. Таким образом создается дополнительная гарантия надежной работы техники, так как эксплуатационные характеристики ГСМ не всегда совпадают с результатами их оценки путём физико-химического анализа.

Каждый ГОСТ имеет порядковый номер; последние две цифры указывают год принятия или пересмотра стандарта (например, ГОСТ 10227- 86 на топлива для реактивных двигателей в действующей редакции принят в 1986 г.). Обычно стандарты пересматриваются каждые несколько лет в соответствии с накопившимся опытом применения, улучшением технологии производства и другими данными. Кроме того, Госстандарт России по предложениям потребителей и поставщиков ГСМ, а также изготовителей авиационной техники вносит в стандарты изменения и уточнения. Они публикуются в Информационном указателе стандартов.

Качество новых сортов ГСМ, по которым нет еще достаточных данных для стандартизации, а также таких сортов, масштабы производства и применения которых невелики, регламентируется отраслевыми стандартами (ОСТ) или техническими условиями (ТУ). Обычно они действуют несколько лет, в течение которых выясняются результаты испытаний и уточняются возможности производства. Отраслевые стандарты и технические условия на нефтепродукты обозначают цифрой 38, многозначным регистрационным номером и годом принятия (например, ОСТ 38.101163-85 на масло МС-8РК, ТУ 38.101657-85 на масло ИПМ-10).



**11.1.2. Государственные стандарты на лабораторные методы испытаний ГСМ.** В стандартах, определяющих технические требования на ГСМ, по каждому из показателей качества установлена не только норма, но и метод определения. Обычно указывается номер стандарта на метод испытания (например, для определения плотности – ГОСТ 3930-47, вязкости – ГОСТ 33-66 и т. д.). Это необходимо потому, что численное выражение каждого показателя существенно зависит от метода определения. При отсутствии единства в методах анализа могут быть напрасно забракованы кондиционные ГСМ, а некондиционные – допущены к применению. Результатом этого могут быть перебои в снабжении, порча доброкачественного топлива или масла, выход из строя авиационной техники и даже гибель личного состава.

Государственные стандарты на методы испытаний регламентируют аппаратуру, порядок подготовки и проведения испытания, расчетные формулы и допускаемые расхождения параллельных определений. В тех случаях, когда метод отдельно не стандартизирован, его излагают в приложении к ГОСТ на соответствующий сорт ГСМ.

**11.1.3. Сертификация ГСМ.** Система поставок авиационных ГСМ потребителю (военной и гражданской авиации) обеспечивает ему гарантию качества каждой приобретаемой им партии ГСМ конкретной марки. Она состоит в приеме каждой партии по результатам испытаний (в объеме полного анализа) пробы ГСМ этой партии, взятой из товарного резервуара (или иной тары изготовителя). Испытаниями подтверждается соответствие ГСМ требованиям ГОСТ или ТУ.

Испытания проводит предприятие-изготовитель авиационных ГСМ в аттестованной (сертифицированной) лаборатории ГСМ. Результаты испытаний фиксируют в документации предприятия, а для потребителя оформляют паспорт качества.

Предприятие-изготовитель авиа ГСМ несет ответственность за их качество и достоверность указанных в паспорте показателей качества. Подпись и печать военного представителя подтверждают прием конкретной партии авиа ГСМ для применения по прямому назначению в военной авиации.

Стабильность эксплуатационных характеристик производимых авиаГСМ предприятие-изготовитель подтверждает их периодическими, не реже ежегодных, испытаниями в объеме комплекса методов квалификационной оценки. Протоколы испытаний предоставляются потребителю по требованию. Долговременные договорные отношения с крупными нефтеперерабатывающими компаниями и системой военной приемки обеспечивают военной авиации стабильность качества авиационных ГСМ.

Более сложная система обеспечения качества авиаГСМ, принята в гражданской авиации, – сертификация ГСМ, соответствует международной практике. При большом числе самостоятельных авиационных транспортных компаний, свободных в выборе поставщиков ГСМ, и большом числе предприятий-изготовителей сертификация обеспечивает единый уровень качества ГСМ, получаемых потребителем.

Сертификация (от лат. *certifico* – удовлетворяю) – система контроля соответствия товарной продукции нормативным документам, устанавливающим

требования к ней. *Обязательная сертификация* продукции осуществляется в соответствии с документами, направленными на обеспечение ее *безопасности для жизни, здоровья людей и окружающей среды*. Она распространяется на все производимые авиаГСМ, предназначенные для реализации на территории Российской Федерации. Соблюдение правил обязательной сертификации и сертифицированная продукция подлежат государственному контролю и надзору.

Предприятие изготовитель авиаГСМ проводит их *добровольную сертификацию* на соответствие требованиям нормативной документации по их качеству (ГОСТ, ТУ). Право на их использование в гражданской авиации дает ее проведение в системе сертификации на воздушном транспорте. Срок действия сертификации до 3 лет.

Возможность приобретения партии авиаГСМ потребителем для его последующего применения по прямому назначению в гражданской авиации подтверждается сертификатом соответствия и паспортом качества предприятия-изготовителя. Паспорт качества характеризует фактическое качество конкретной партии авиаГСМ, находящейся в товарных резервуарах или иной таре предприятия-изготовителя.

## **11.2. ПОРЯДОК ПРИНЯТИЯ АВИАЦИОННЫХ ГСМ НА СНАБЖЕНИЕ И ИЗМЕНЕНИЯ НОМЕНКЛАТУРЫ ПРИМЕНЯЕМЫХ ГСМ**

**11.2.1. Подбор ГСМ для авиационной техники.** Свойства ГСМ учитываются с самого начала проектирования самолета или вертолета, двигателя, агрегата. От них зависят размеры элементов системы и бортовой запас топлива, избыточное давление для обеспечения требуемой высотности, параметры насосов, фильтров, теплообменников, форсунок, конструкция узлов трения, контактные давления, выбор контактирующих материалов и т. п.

Разработчики авиационной техники составляют химмотологические карты, в которых назначаются основные, дублирующие и, как правило, резервные марки ГСМ (см. 11.2.6), а также на зарубежные аналоги. Химмотологические карты должны быть согласованы с производителем ГСМ и с их потребителем, осуществляющим эксплуатацию авиационной техники.

При разработке новых объектов техники ориентируются на ограничительный перечень сортов ГСМ, рекомендованных к производству и применению. Без крайней необходимости введение новых сортов ГСМ не оправдано с точки зрения организации снабжения, использования трубопроводов, хранилищ, заправочных средств. Многосортица топлив и смазочных материалов неизбежно отражается на боеготовности авиации.

Когда же особенности новой техники все же требуют применения новых сортов ГСМ, не включенных в номенклатуру ограничительного перечня, то они должны быть приемлемыми по стоимости, технологическим возможностям производства, ресурсам сырья. В противном случае вновь разработанный объект окажется не обеспеченным ГСМ или же его эксплуатация будет непомерно дорогой.

Исходя из этого, при выборе ГСМ неизбежны компромиссные решения, если только они не отражаются на безопасности полетов и не вызывают существенного снижения боевой или коммерческой (для гражданской авиации) эффективности

авиационной техники. Однако рост скорости, высоты, дальности полета и срока службы техники приводит к коренным качественным изменениям не только сортамента, но и самой природы выбираемого топлива, масла, смазки или технической жидкости. Примером этого являются реализованный в свое время переход от нефтяных авиационных масел к синтетическим, перспективы применения криогенных топлив вместо керосина.

**11.2.2. Система испытаний ГСМ.** Основные функциональные свойства авиационных ГСМ, необходимые для обеспечения заявленной тяги или мощности и экономичности силовых установок самолетов и вертолетов, а также нормативов работоспособности их бортовых систем, обычно определены самой природой ГСМ при их разработке. Поэтому при испытаниях главное внимание уделяется тем эксплуатационным свойствам, которые влияют на надежность систем и устройств силовых установок – термоокислительной стабильности, прокачиваемости, испаряемости, воздействию на материалы систем ЛА, а для топлив, кроме того, особенностям горения (в том числе саже- и нагарообразованию) и смазочной способности, не являющейся для топлив функциональным свойством. Проверка авиационных ГСМ по влиянию на надежность техники, учитывая катастрофические последствия ее отказов, является главной задачей их испытаний.

Наиболее информативны в этом плане квалификационные испытания авиационных ГСМ на модельных установках, в которых имитируются процессы и условия применения ГСМ, характерные для реальных силовых установок и бортовых систем самолетов и вертолетов. Они обеспечивают возможность объективного сравнения опытных образцов с теми, на которых отрабатывалась и эксплуатируется авиационная техника. На модельных установках могут быть проиграны экстремальные ситуации, которые трудно осуществить при испытаниях натурной авиационной техники, и произведено сравнение ГСМ в наиболее жестких условиях, где в максимальной мере выявляются различия между ними.

Однако решение вопроса о пригодности новых марок ГСМ для конкретной авиационной техники возможно только по результатам их испытаний на ГТД в стендовых условиях и на ЛА в полете. Этими испытаниями определяется соответствие характеристик техники при работе на опытных ГСМ предъявляемым к ней тактико-техническим требованиям, а ее надежность определяется в условиях совместного влияния всего комплекса эксплуатационных факторов, неосуществимого на модельных установках. Опытные образцы товарных ГСМ проходят государственные квалификационные испытания, а опытные образцы ГСМ новых марок – государственные приемочные испытания из 4 этапов, первый из которых аналогичен квалификационным и проводится на модельных установках, а три следующих – на натуральных объектах техники (для авиационных ГСМ – стендовые, контрольно-летные и войсковые).

Организацию этих государственных испытаний и руководство их проведением осуществляет *Межведомственная комиссия по допуску к производству и применению топлив, масел, смазок и специальных жидкостей* при Государственном Комитете по стандартизации и метрологии. По результатам государственных испытаний опытных образцов ГСМ Межведомственная комиссия при-

нимает решение о допуске их к производству и применению и в дальнейшем осуществляет контроль за организацией их промышленного производства. В ведении Межведомственной комиссии находятся также все методические вопросы испытаний ГСМ, проблемы повышения их научно-технического уровня, сокращения объема и сроков проведения. Решения Межведомственной комиссии по вопросам, входящим в ее компетенцию, обязательны для всех министерств и ведомств.

**11.2.3. Государственные квалификационные испытания опытных образцов** товарных авиационных ГСМ. Представляемые на испытания образцы, изготавливаются на промышленных или полупромышленных установках из сырья и компонентов завода-изготовителя с теми изменениями их состава и технологии, которые намечено внедрить в производство. Испытания проводятся с целью определения соответствия физико-химических и эксплуатационных свойств опытного образца товарной продукции требованиям ГОСТ или технических условий и нормам комплекса методов квалификационной оценки (КМКО) на данный вид продукции, а также возможности допустить продукцию такого образца к применению наравне со стандартной. Они состоят из лабораторных испытаний в объеме требований ГОСТа (ТУ), испытаний в объеме КМКО на данный вид авиационных ГСМ, утвержденного Госкомиссией, и по решению Госкомиссии – дополнительно по методам, не входящим в КМКО. При отсутствии норм КМКО на соответствующий вид ГСМ опытный образец оценивается путем параллельных испытаний в сравнении со стандартным образцом.

Испытания в объеме КМКО являются главной частью государственных квалификационных испытаний. Квалификационные методы испытаний, входящие в КМКО авиационных топлив и масел, предназначены для оценки их эксплуатационных свойств на лабораторных аппаратах, модельных установках, натурных агрегатах и узлах авиационной техники в условиях специально оборудованных стендов вне двигателя и ЛА. Многие из них обеспечивают имитацию характерных, в том числе наиболее жестких условий применения ГСМ в полете. Оборудованием, необходимым для испытаний топлив и масел в объеме КМКО, и квалифицированными специалистами – химмотологами, способными проводить такие испытания, располагают только химмотологические центры промышленности и Вооруженных Сил, на которые и возлагается проведение государственных квалификационных испытаний авиационных ГСМ. Срок их проведения не должен превышать 3 месяцев.

**11.2.4. Государственные приемочные испытания опытных образцов новых** марок авиационных ГСМ. Первый этап государственных приемочных испытаний – лабораторно-стендовые испытания, которые проводятся в химмотологических центрах промышленности и Вооруженных Сил с целью определения соответствия опытного образца ГСМ требованиям технического задания на его разработку, требованиям КМКО данного вида ГСМ и дополнительным показателям, согласованным с заинтересованными организациями, а также возможности допуска к дальнейшим этапам испытаний. По организации, содержанию и сроку проведения этот этап практически не отличается от полного объема государственных квалификационных испытаний.



Второй этап государственных приемочных испытаний авиационных топлив и масел новых марок – *стендовые испытания на серийных или опытных ГТД*, для которых они предназначены, проводятся, как правило, на предприятиях авиационной промышленности. Их цель – определить надежность работы этих ГТД на топливах и маслах новых марок, а также целесообразность проведения дальнейших испытаний. Образцы топлив и масел для стендовых испытаний изготавливаются на опытно – промышленной установке. Срок испытаний – 4 месяца.

Испытаниями определяют соответствие основных технических данных двигателя требованиям ТУ при работе в течение установленного ресурса на опытном топливе или масле, выявляют связанные с их специфическими свойствами особенности работы и технического обслуживания двигателя, влияние на состояние его узлов и агрегатов после гарантийной наработки, а также изменение свойств опытного образца топлива или масла в условиях работы двигателя. На серийных ГТД испытания проводят на ресурс, если он не превышает 300ч, а при большем ресурсе – по программе 300-часовых комиссионных испытаний 5-часовыми этапами. На опытных ГТД испытания проводят по программе государственных испытаний двигателей. Через каждые 25ч режимной работы, после регламентных работ и в конце испытаний проводят отбор проб и анализ топлива и масла из систем двигателя.

С целью сокращения сроков испытаний и расходуемого на них топлива, а также повышения достоверности укороченных испытаний высокоресурсных ГТД в последние годы практикуются сокращенные до 100-150ч эквивалентные испытания с увеличенным относительным временем работы на форсированных, максимальных и переходных режимах по сравнению с работой в эксплуатации. Такие испытания позволяют правильно оценить факторы, связанные с высокотемпературными свойствами топлив и масел (термоокислительной стабильностью, испаряемостью), но недостаточны для проявления их смазочной способности, а также термоциклического фактора, обусловленного излучением пламени. Дальнейшим шагом в совершенствовании подобного рода испытаний являются эквивалентно-циклические программы, в которых реализуется число циклов переменных режимов, характерное для полного ресурса ГТД в эксплуатации.

После испытаний двигатель разбирают, снимают характеристики агрегатов, производят осмотр и дефектацию деталей, в том числе микрометрический обмер изнашиваемых участков, снимают и подвергают физико-химическому анализу нагары и отложения.

Третий этап государственных приемочных испытаний авиационных ГСМ – *контрольно-летные испытания на самолетах и вертолетах*, для которых они предназначены. На серийных ЛА они проводятся научно-испытательными организациями ВВС и Гражданской авиации, а на вновь созданной авиатехнике – ее разработчиками. Срок проведения этих испытаний на серийной авиатехнике, как правило, не более 4 месяцев. Цель испытаний — при работе на опытном топливе или масле определить соответствие основных летно-технических характеристик ЛА, технических данных двигателей, топливных и масляных систем требованиям ТУ, выявить особенности их эксплуатации и технического обслуживания, проверить надежность и устойчивость работы двигателей на всех ре-

жимах во всем диапазоне высот и скоростей полета, а также определить изменение физико-химических свойств топлива и масла после выполнения полетов. Нароботка ГТД за время этих испытаний должна быть не менее 25ч.

Контрольно-летные испытания опытного топлива и масла относятся к высшей категории сложности. В процессе их проведения создаются условия, которые могут привести к повышению температуры топлива или масла, падению давления в системах их подачи, кавитации, масляному голоданию, отказам автоматики, самовыключению двигателя или форсажной камеры, невключению или невыключению форсажа, ненадежному запуску остановленного двигателя в полете. По результатам контрольно-летных испытаний может быть дана рекомендация о допуске опытного топлива или масла к применению или же о целесообразности проведения последнего, четвертого этапа.

Четвертый этап государственных приемочных испытаний авиационных ГСМ – *войсковые испытания* (в Гражданской авиации – эксплуатационные испытания), целью которых является определение эксплуатационно-технических свойств опытного образца новой марки ГСМ, особенностей его применения в условиях эксплуатации, а также возможности допустить его к применению. Опытные образцы ГСМ для этих испытаний изготавливаются на промышленных установках. Для их проведения выделяются две-три строевые части, а для методического и технического руководства назначается комиссия с участием представителей научно-исследовательских учреждений. Продолжительность испытаний должна быть не менее одного года с выработкой двенадцатью двигателями гарантийного ресурса, если он не превышает 500 ч. В случае большего ресурса первые 6 двигателей, наработавшие 500 ч (лидерные), снимают для разборки и дефектации. По их состоянию принимают решение о допуске опытного топлива или масла к применению или продолжении испытаний еще на шести двигателях до полной выработки ресурса. Большинство полетов совмещается с выполнением задач боевой подготовки частей, но отдельные полеты проводятся по специальным заданиям.

**11.2.5. Допуск к применению ГСМ.** *Межведомственная комиссия по допуску к производству и применению топлив, масел, смазок и специальных жидкостей* при Госстандарте России по результатам испытаний и принимает решение о допуске для применения или о доработке или же отклонении сорта ГСМ, проходившего испытания. В отдельных случаях, учитывая опыт применения и испытаний аналогичных (близких по составу и свойствам) образцов ГСМ, решение принимается сразу после стендовых испытаний. Если необходимо, даются рекомендации об изменениях в инструкции по эксплуатации техники, связанных с внедрением нового сорта ГСМ, или о необходимости отдельных изменений в конструкции техники.

Сорта ГСМ, рекомендованные Межведомственной комиссией к применению на конкретной авиационной технике, объявляются приказом Министра обороны РФ или Главнокомандующего ВВС, или же указанием Главного инженера ВВС.

Таким образом, в целях обеспечения надежности работы авиационной техники и безаварийности полетов применяемый сортамент авиационных ГСМ

определяется в общегосударственном масштабе. Командиры и инженерно-технический состав авиационных частей и соединений, а также служба горючего не имеют права принимать самостоятельных решений по применению авиационных ГСМ, которые не соответствовали бы действующим приказам, руководствам, стандартам, техническим условиям, инструкциям по эксплуатации авиационной техники, единым регламентам и другим руководящим и нормативным документам. При этом, как правило, по экономическим соображениям не должны применяться ГСМ более высоких сортов, чем предусмотрено для данного вида техники, за исключением неотложных случаев.

**11.2.6. Основные, дублирующие и резервные сорта ГСМ.** Для каждого типа авиационной техники назначены основные, дублирующие и, как правило, резервные сорта ГСМ.

*Основные сорта ГСМ* имеют высокие эксплуатационные свойства и обеспечивают работу техники в течение установленного ресурса. Их рассматривают в качестве перспективных для унификации и сокращения номенклатуры ГСМ.

*Дублирующие сорта ГСМ* обеспечивают работу техники при отсутствии основных сортов. Они близки по физико-химическим и эксплуатационным свойствам к основным сортам.

*Резервные сорта ГСМ* уступают по качеству основным и дублирующим сортам, позволяют с пониженной надежностью выполнять поставленные задачи в особых условиях. В качестве резервных используют также сорта ГСМ с лучшими эксплуатационными свойствами или другого функционального назначения, применение которых экономически не оправдано в обычных условиях эксплуатации. Назначение резервных сортов *топлив* является обязательным.

Основные и дублирующие сорта обычно, взаимно совместимы, но допускается в исключительных случаях несовместимость; при этом в эксплуатационной документации указаны порядок их замены.

Для каждого вида техники, как правило, назначен один основной сорт ГСМ. Назначение нескольких основных сортов допускается, если нет ни одного, обеспечивающего всесезонную эксплуатацию техники в различных климатических зонах. Количество дублирующих сортов ГСМ определено с позиции возможно более широкого использования ГСМ различных марок при отсутствии основного сорта. Ограничений по количеству резервных сортов не установлено. По использованию дублирующих и резервных сортов ГСМ указаны, если необходимо, режимные и ресурсные ограничения и мероприятия, обеспечивающие их применение.

**11.2.7. Порядок изменения номенклатуры ГСМ.** В случае прекращения производства применяемых сортов ГСМ (вышло из строя технологическое оборудование, исчерпаны ресурсы сырья, установлен экологический запрет) или выявления эксплуатационных недостатков, требующих прекращения применения отдельных сортов ГСМ, взамен них указанием Главного инженера ВВС допускаются к применению новые сорта. В указании дается обоснование этого, в том числе исходя из результатов испытаний новых сортов, а также порядок замены.

В дальнейшем по согласованию с поставщиками авиационной техники и авиационных ГСМ, снятые с производства и применения сорта ГСМ решением

Госстандарта России исключаются из номенклатуры, а новые, допущенные к применению, включаются в номенклатуру ограничительного перечня марок ГСМ.

Введение новых сортов в качестве дублирующих или резервных не требует немедленного исключения из номенклатуры тех сортов, применение которых прекращено. Напротив, ГСМ ранее применявшихся сортов дорасходятся по прямому назначению в первую очередь, если нет указания, запрещающего или ограничивающего применение заменяемых сортов.

### 11.3. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ГСМ

**11.3.1. Организация контроля качества ГСМ.** Некондиционными считаются ГСМ, которые не соответствуют техническим нормам хотя бы по одному показателю качества. Их запрещается применять по прямому назначению во избежание отказов в работе техники или снижения ее тактико-технических данных. Однако полная проверка соответствия ГСМ стандарту или техническим условиям требует определения порядка двадцати показателей по каждой партии или отдельному образцу. По трудоемкости, необходимым техническим средствам и уровню квалификации персонала это посильно как правило, только стационарным лабораториям. Полный анализ ГСМ первоначально производится поставщиком, за него отвечают представители заказчика на нефтеперерабатывающих и химических заводах. В дальнейшем, в соответствии с установленным порядком, его выполняют лабораторий складов ГСМ округа и территориальных центров обеспечения (ТЦО). Они гарантируют качество отгруженных ГСМ паспортом, содержащим фактические результаты проверки всех показателей, предусмотренных ГОСТ, ОСТ, или ТУ.

В основе повседневного контроля качества ГСМ при приемке, транспортировании, перекачке, хранении, выдаче со склада ГСМ авиационно-технических части, заправке самолетов и вертолетов лежит *принцип частичного анализа* и сопоставления его результатов с данными предшествующего полного анализа, записанными в паспорте. Лаборатории ГСМ воинских частей проверяют лишь некоторые характерные показатели, определение которых не требует большой затраты труда и времени. Совпадение нескольких проверенных показателей (например, плотности, вязкости, фракционного состава) с данными паспорта в пределах допустимой погрешности метода испытания свидетельствует о том, что топливо или масло не перепутано и не смешано с ГСМ другой партии и, следовательно, остальные показатели качества не отличаются от паспортных.

В дополнение к этому проверяются показатели, отклонение которых может быть связано с внешним загрязнением, естественными физико-химическими процессами, а также такие свойства, отклонение которых от нормы может вызвать немедленный отказ в работе техники (например, содержание меркаптановой серы в топливах из сернистых нефтей).

**11.3.2. Виды анализа.** Системой контроля качества ГСМ предусмотрено четыре вида анализа — *приемо-сдаточный, контрольный, складской и полный анализ*, а также *визуальная проверка чистоты ГСМ* (осмотр проб и отстоя). Если возникли разногласия в оценке качества ГСМ между отправителем и получателем или лабораториями различных воинских частей, проводится *арбитражный анализ*.



Возможности лаборатории авиационно-технических частей обычно ограничены проведением первых двух видов анализа. Аппаратура, реактивы и приспособления для выполнения приемо-сдаточного и контрольного анализов поставляются лабораториям авиационно-технических частей в виде комплекта *полевой лаборатории* ПЛ-2М. Некоторые лаборатории авиационно-технических частей, дислоцированные на стационарных аэродромах, оснащены в достаточной степени для выполнения складского и полного анализа.

*Приемо-сдаточный анализ ГСМ.* проводится при приеме ГСМ из железнодорожных цистерн, вагонов, танков наливных судов и перед отгрузкой ГСМ. Допускается слив прибывшей партии ГСМ в отдельную зачищенную емкость склада до анализа с последующим его проведением в течение 24 ч. Приемо-сдаточный анализ реактивного топлива состоит из определения плотности при 20°C, фракционного состава, содержания водорастворимых кислот и щелочей (ВКЩ), отсутствия механических примесей и воды; анализ масла – плотности, температуры вспышки, вязкости при положительной температуре, содержания ВКЩ, отсутствия механических примесей и воды.

*Цель анализа – убедиться, что сорт и качество ГСМ прибывшей партии соответствуют документам отправителя (накладной и паспорту).* Если показатели, например, плотность, по результату анализа не совпадают с данными паспорта отправителя (с учетом допустимой погрешности, предусмотренной стандартом на метод испытания), это значит, что документы отправителя ошибочно приложены не к той партии ГСМ или же произошло изменение качества ГСМ в процессе транспортирования или предшествующего хранения (например, в результате примеси других ГСМ). Поскольку паспорт отправителя в этом случае не характеризует качество ГСМ даже при соответствии проверенных показателей стандарту, необходимо проведение полного анализа, оформление нового паспорта и решение вопроса о пригодности ГСМ. Например, приему не подлежит топливо ТС-1 с плотностью 780 кг/м<sup>3</sup>, если в паспорте указана плотность 775 кг/м<sup>3</sup>.

*Контрольный анализ ГСМ* проводят после слива поступивших ГСМ в емкости склада (из них берут пробы). Проверяют те же показатели реактивного топлива, что при приемо-сдаточном анализе (кроме ВКЩ), а также температуру вспышки после перекачки. Если дата выработки топлива неизвестна или оно поступило после хранения более трех лет, то проверяется содержание фактических смол, термостабильность и кислотность. При контрольном анализе масел определяют те же показатели, что при приемо-сдаточном анализе.

Контрольный анализ проводится также после каждой перекачки ГСМ из одного резервуара в другой, слива ГСМ из баков самолетов или цистерн топливозаправщиков в складскую емкость и по истечении 12 месяцев хранения.

*Цель контрольного анализа ГСМ – убедиться, что не произошло его смешения с другими сортами ГСМ при сливе и перекачке, а при хранении – установить начало изменения качества.* Поскольку допускается смешение с ГСМ того же сорта, решение о пригодности ГСМ по данным контрольного анализа принимается по соответствию нормам ГОСТ, ОСТ или ТУ, а совпадение с предшествующим паспортом не обязательно.

*Складской анализ ГСМ*, находящегося в резервуаре и таре, проводится в соответствии с установленными, например, продленными на год, сроками хранения, (при длительном хранении он выполняет роль полного анализа).

Цель складского анализа ГСМ – определить по установленному перечню показателей сокращенному по сравнению с полным анализом, соответствия качества ГСМ требованиям ГОСТ (ТУ), чтобы подтвердить возможность его применения по прямому назначению или дальнейшего хранения до очередного анализа.

*Полный анализ* проводится перед закладкой топлива или масла на длительное хранение, после 12 месяцев хранения и после исправления качества, а также при приеме ГСМ, если обнаружены неисправности цистерн, тары, документации или приемо-сдаточный анализ показал несоответствие паспорту поставщика. Обычно полный и складской анализ он проводятся в стационарных лабораториях ГСМ, туда отправляют надлежащим образом упакованные пробы из лабораторий авиационно-технических частей.

По каждому из четырех видов анализа установлен перечень показателей качества, подлежащих определению. Сокращать его запрещается.

*Арбитражный анализ ГСМ* проводится при возникновении разногласий в оценке качества ГСМ между различными лабораториями, а также обоснования претензии поставщику или транспорту, определения виновного в порче ГСМ, в случае авиационных происшествий. По объему арбитражный анализ обычно не отличается от полного анализа, но при необходимости выявить причину отказа в работе техники может включать дополнительные определения по отдельным методам квалификационных испытаний. Проведение арбитражного анализа возлагается на лабораторию ГСМ объединения, военного округа или другую специально назначенную лабораторию. Арбитражные пробы отбирают одновременно с пробами для приемо-сдаточного анализа и хранят до израсходования данной партии ГСМ, а если обнаружена некондиционность ГСМ – до решения вопроса о рекламации.

На рис. 11.1. представлены последовательность и порядок проведения анализов топлива начиная от предприятия-изготовителя и кончая заправкой в ЛА.

**11.3.3. Обязанности специалистов ИАС по контролю качества ГСМ.** Инженеры авиационных частей и подразделений отвечают за применение на самолетах и вертолетах только тех сортов ГСМ, которые предусмотрены инструкцией по эксплуатации и другими нормативными документами, за сохранение качества ГСМ в процессе заправки и при хранении в баках самолетов и вертолетов. Кроме того, инженер авиационной части в составе комиссии, назначенной командиром части, периодически, не реже двух раз в год, проверяет состояние хранения ГСМ в авиационно-технической части, документацию по качеству ГСМ, своевременность и полноту проведения анализов ГСМ, систему фильтрации топлива на складе ГСМ и оборудование пункта выдачи масел.

Инженер дает разрешение на заправку самолетов и вертолетов своей подписью в контрольном талоне, проверив соответствие сорта ГСМ требуемому для данного типа самолета или вертолётa, состояние средств заправки, отсутствие механических примесей, воды и кристаллов льда в пробе ГСМ, взятой не ранее чем через 10 минут после прибытия автомобиля на стоянку и слива отстоя.

Представитель ИАС может производить контрольный осмотр средств заправки и подписывать контрольные талоны непосредственно на складе ГСМ, проверяя при этом также чистоту донных проб, взятых из расходных резервуаров.

Паспорта на ГСМ перед заправкой самолетов и вертолетов обычно не предъявляются. Если инженеру необходимо подробно познакомиться с качеством заправляемых ГСМ, он проверяет паспорта в лаборатории или на складе ГСМ.

Техник самолета или вертолета перед заправкой проверяет контрольный талон и наличие на нем подписи инженера, чистоту и исправность раздаточных кранов, а перед вылетом – чистоту топлива, взятого из нижних точек топливной системы самолета или вертолета.

При выполнении регламентных работ или устранении дефектов двигателя начальник ТЭЧ производит осмотр слитого масла. Если оно помутнело из-за растворения прокладочных материалов, то срок службы масла сокращают (но не более чем вдвое). При переходе на осенне-зимнюю или весенне-летнюю эксплуатацию горячее масло сливают и проверяют на расслаивание: не выдержавшее проверки расслоившееся масло заменяют свежим независимо от срока службы. Ежемесячно производят визуальную проверку чистоты гидромасла во всех системах самолетов и вертолетов.

#### **11.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ГСМ НА АЭРОДРОМЕ**

**11.4.1. Состояние наземных технических средств.** Чтобы донести высокое качество авиационных ГСМ, достигаемое при их производстве, до самолета и вертолета, предусмотрена система мероприятий по обеспечению чистоты ГСМ при приеме, выдаче и заправке, предотвращению их порчи при длительном хранении. Первым из них является содержание в исправности и чистоте резервуаров, цистерн, трубопроводов, рукавов, сливо-наливного оборудования, заправочных средств [27]. Подразделения авиационного тыла проводят регламентные работы, установленные для наземных технических средств, и регулярно зачищают емкости. На резервуарах периодически, а на заправочных средствах ежедневно перед применением контролируется состояние внутренних антикоррозионных покрытий, крышек, прокладок, дыхательных клапанов, раздаточных устройств и наличие, где положено, пробок и чехлов. Особенно важно защищать наземные технические средства от попадания в них пыли и атмосферных осадков при перекачке ГСМ и заправке авиационной техники.

При подготовке ЛА к полетам трудоемкой и ответственной операцией является заправка их топливом, маслом и специальными жидкостями. Предъявляются высокие требования к чистоте ГСМ и к скорости заправки.

Заправочная техника контролируется при выходе из автопарка и склада ГСМ специалистами авиационно-технической части, а затем на стоянке автотранспорта или заправочной площадке аэродрома – специалистами ИАС. Контроль производится после каждого заполнения емкостей средств заправки топливом, маслом, технической жидкостью, а также после устранения отказов и неисправностей в системах специального оборудования средств заправки.

Специальной проверке подвергаются фильтры средств заправки – соответствие их по типу и тонкости фильтрации, по остатку ресурса фильтрационных чехлов, а также перепаду давления при прокачке топлива через раздаточный

кран в собственную цистерну заправщика. Если он ниже 30 кПа (0,3 кг/см<sup>2</sup>), это свидетельствует о разрыве чехла или неисправной обвязке фильтр-элемента, а если выше 150 кПа (15 кг/см<sup>2</sup>) – о его засорении.

**11.4.2. Средства заправки топливом и жидкостями.** *Автотопливозаправщики*, предназначенные для механизированной заправки летательных аппаратов фильтрованным топливом, позволяют наполнять собственную цистерну топливом из постороннего резервуара с помощью своего насоса, заправлять фильтрованным топливом баки летательных аппаратов открытым и закрытым способами из собственной цистерны и из постороннего резервуара, перекачивать топливо из резервуара в другой, минуя собственную цистерну, перемешивать топливо в собственной цистерне или в постороннем резервуаре, производить слив топлива из баков ЛА, отсос топлива из раздаточных рукавов, осуществлять перевозку и временное хранение топлива. Емкость цистерн автотопливозаправщики ТЗ-5, ТЗА-7,5-500А, ТЗ-8-255Б, ТЗ-22М, ТЗ-30; соответственно 5000, 7500, 8000, 22000, 30000 литров топлива.

*Централизованные заправщики топливом ЦЗ-1М и ЦЗТ-4М* предназначены для групповой заправки ЛА фильтрованным и обезвоженным топливом, с подачей, соответственно, 8,3 и 5,4 л/с. С их помощью производят предварительную фильтрацию топлива перед поступлением в расходные резервуары, отстой топлива и верхний его забор из расходных резервуаров, двойную фильтрацию и обезвоживание топлива, подачу его на заправку с заданным давлением. Они обеспечивают обратный слив топлива из баков ЛА и раздаточных шлангов, добавление к топливу ПВК жидкостей в нужной пропорции.

*Перекачивающие станции горючего ПСГ-160, ПСГ-75 и мотопомпы перекачки горючего МПГ-60, МПГ-50М, МПГ-30, МНУГ-20* предназначены для перекачки топлива из одной емкости в другую, позволяют перекачивать топливо из железнодорожных цистерн в резервуары склада ГСМ, наполнять цистерны автотопливозаправщиков, перекачивать топливо в системах централизованной заправки ЛА, перекачивать топливо из автоцистерн и цистерн автотопливозаправщиков в резервуары склада ГСМ. Цифрой в марке указана подача топлива в м<sup>3</sup>/ч.

*Автоцистерны АЦ-8-500А и АЦ-8.5-255Б* емкостью, соответственно, 8 и 8,5 м<sup>3</sup> предназначены для транспортирования горючего. Их цистерны наполняются собственным насосом, а выдачу топлива можно производить своим насосом или самотеком. Насос позволяет также перекачивать топливо, минуя свою цистерну, и отсасывать топливо из раздаточных рукавов.

**11.4.3. Заправщики маслом и специальными жидкостями.** *Маслозаправщик МЗ-66* на шасси ГАЗ 66 предназначен для транспортирования, временного хранения, подогрева маслосмесей и минеральных масел и для заправки ими ЛА фильтрованными маслами и маслосмесями.

Бак маслозаправщика МЗ-66 емкостью 0,8 м<sup>3</sup> заполняется как с помощью насоса так и с помощью постороннего перекачивающего средства. Нагрев масла до необходимой температуры обеспечивается сжиганием керосина в жаровой трубе, через которую проходит змеевик с подогреваемым маслом.

*Заправщик специальными жидкостями ЗСЖ-66* с четырьмя системами предназначен для заправки ЛА фильтрованными синтетическими или мине-



ральными маслами (215 л), маслосмесями (215 л), гидравлическими жидкостями (215 л) и пусковым топливом (270 л бензина). Эти емкости заполняются своими насосом. Заправщик снабжен своеобразной безфакельной системой подогрева масел и маслосмесей, которая заключается в прокачке масла под давлением до 17 МПа через змеевик, имеющий большое гидравлическое сопротивление, расположенный внутри емкостей.

*Агрегат механизированной заправки АМЗ-53МС*, наиболее часто используемый для заправки масло- и гидросистем, и системы пускового топлива (бачки по 30л каждый). Агрегат состоит из трехколесной тележки, внутри корпуса которой смонтированы три емкости с водомерными стеклами, два баллона со сжатым воздухом, два воздушных редуктора (высокого и низкого давления), фильтры тонкой очистки и раздаточные рукава с пистолетами. Принцип действия его основан на вытеснении рабочих жидкостей из емкостей с помощью сжатого воздуха.

*Водоспиртозаправщики ВСЗ-66 и ВСЗ-375* предназначены для заправки ЛА фильтрованными спиртом, водно-спиртовой смесью и дистиллированной водой и подогретой до необходимой температуры расположены соответственно на шасси ГАЗ-66 и Урал-375. Емкость спиртового бака соответственно 0,25 м<sup>3</sup> и 0,75 м<sup>3</sup>, а водно-спиртовых 0,65 м<sup>3</sup> и 1,7 м<sup>3</sup>.

**11.4.4. Установки для проверки и дозаправки гидросистем.** Они подают жидкости в гидросистемы ЛА с давлением 15 МПа. С их помощью производится проверка на герметичность и опрессовка агрегатов и гидросистем ЛА, и гидроустановок.

Установка для проверки гидросистем УПГ-300 (на 300 л) смонтирована в специальном кузове на шасси ЗИЛ-131. В кузове гидроустановки УПГ-250ГМ смонтированы 2 системы общей емкостью 200л на шасси ГАЗ 52А, силовая установка с раздаточной коробкой, гидравлическая система, пневматическая система подавливания гидробаков, электрооборудование, панели приборов управления и контроля, панели выводов и кольцевания.

## **11.5. ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ И ЗАПРАВКИ ГСМ**

**11.5.1. Подготовка авиационного топлива к выдаче на заправку.** Топливо перед отгрузкой с выработавших его предприятий очищается путем отстаивания и фильтрации от механических примесей крупнее 20-30 мкм, эмульсионной воды, зимой от кристаллов льда. Однако при транспортировании, приеме на склад ГСМ, хранения на складе, наливке заправочных средств, заправке баков самолетов и вертолетов и в самих баках вновь идет загрязнение топлива механическими примесями и водой (при отрицательной температуре – в виде мелких кристаллов льда). Даже такое топливо, из которого были полностью отфильтрованы частицы механических примесей недопустимого размера, через некоторое время может оказаться вновь загрязненным опасными механическими примесями (рис.11.2.).

Чтобы обеспечить заправку самолетов и вертолетов чистым топливом производится его подготовка согласно технологической карте по схеме, показанной на рис.11.3. Из транспортных средств (железнодорожных цистерн, наливных судов и др.) топливо сливается через фильтр грубой очистки в *отстойные*

*резервуары* склада ГСМ как правило, заглубленные. Заправка ЛА топливом "с колес" категорически запрещена. После отстаивания (из расчета 0,3 м/ч) топливо подается в *расходные резервуары*. Плавающие топливоприемники резервуаров забирают топливо сверху, чтобы не захватить загрязненный отстой. В нижней части всех резервуаров есть зачистные устройства для регулярного удаления отстоя. В расходных резервуарах перед выдачей топлива на заправку ЛА оно должно отстаиваться не менее 60 мин.

Топливо, выдаваемое из расходных резервуаров на заправку самолетов, прокачивается через *фильтр-сепаратор* со стеганным чехлом из ткани, отделяющей водную эмульсию, и после него двукратно через фильтры тонкой очистки. Таким образом не только уменьшается содержание воды и механических примесей в топливе, но и замедляется процесс коагуляции микроскопически малых в механические примеси опасных размеров, центрами которого являются мельчайшие капельки воды.

Качество фильтрации существенно зависит от типа и состояния фильтров тонкой очистки. Четырехслойные чехлы (три слоя материала фильтросванбой и слой шелка, задерживающего ворс), а также трехслойные чехлы из материала фильтродиагональ задерживают частицы крупнее 15-20 мкм, нетканые фильтры – крупнее 10 мкм, а фильтровальные элементы из специальной пропитанной бумаги – 5-7 мкм. Визуальный контроль чистоты топлива позволяет исключить применение топлива с механическими примесями, видимыми невооруженным глазом (крупнее 25-30 мкм).

Топливо, недостаточно промытое на заводе после защелачивания, бывает загрязнено нафтеновыми мылами. Они образуют слизистый осадок на дне емкостей и на поверхности фильтрующих материалов. При его появлении необходимо увеличить продолжительность отстаивания топлива до 20-25 суток, а емкости после освобождения от топлива тщательно зачищать.

**11.5.2. Технологическая карта.** Порядок исполнения операций подготовки топлива к заправке подробно изложен в типовой технологической карте выполнения основных работ, обеспечивающих заправку ЛА качественным горючим. По шести операциям в ней перечислен перечень работ по 37 пунктам. Прием топлива из железнодорожных цистерн состоит из работ по 13 пунктам, включая приемо-сдаточный анализ с выдачей разрешения на слив и контрольный анализ после слива; хранение топлива в отстойных резервуарах – 2 пункта; перекачка топлива из отстойных резервуаров в расходные – 5 пунктов; выдача топлива из отстойных резервуаров на заправку авиационной техники – 9 пунктов, включая выдачу контрольного талона на заправку авиационной техники; контроль средств заправки и контроль ГСМ на технической стоянке – 2 пункта, по результатам которых дается разрешение на заправку ЛА; заправка ЛА – 6 пунктов.

На основе типовой технологической карты в авиатехнической части составляют и согласуют с ИАС летной части оперативную технологическую карту, в которой исполняемые операции привязаны к элементам технологической схемы применительно к местным условиям. Конструктивное выполнение технологической схемы должно исключить загрязнение горючего, возможность

его попадания в расходные резервуары минуя отстойные, и из отстойных резервуаров – в ЛА, минуя расходные.

В процессе выполнения операций, предусмотренных технологической картой, 5 раз производится отбор пробы топлива и 4 раза – его анализ (приемосдаточный или контрольный), 9 раз – слив отстоя и проверка его чистоты, более 20 раз делаются записи в служебные журналы, формуляры, контрольный лист журнала подготовки ЛА.

**11.5.3. Введение противоводокристаллизационной жидкости.** В зимнее время, а на транспортных и некоторых других типах самолетов, где возможно охлаждение топлива в полете, – круглый год применяется топливо с противоводокристаллизационной жидкостью (ПВКЖ) марки "И" или ТГФ. Смешивание ПВКЖ с топливом производится с помощью дозаторов в процессе его перекачки из отстойного в расходный резервуар. В исключительных случаях, когда отсутствуют или неисправны дозаторы, для получения однородного раствора приготавливают 5%-ный концентрат ПВКЖ в топливозаправщике, а затем его закачивают в емкость с топливом и производят не менее чем двукратную циркуляцию всего объема. При наличии кристаллов льда циркуляцию продолжают до их исчезновения.

При хранении топлива, содержащего ПВКЖ, нельзя допускать накопления водного слоя под топливом, так как ПВКЖ растворяется в воде лучше, чем в топливе. Если ПВКЖ введена в топливо за месяц или более до его применения, необходимо непосредственно перед выдачей топлива на заправку авиационной техники проверить, сколько в нем содержится жидкости "И" или ТГФ, не потеряна ли она с водным отстоем.

**11.5.4. Заправка ЛА топливом.** Заполнение автотопливозаправщиков кондиционным, чистым, проверенным топливом, их исправность, чистоту и готовность к заправке ЛА обеспечиваются авиационно-технической частью. В случае, когда заправщик (спецавтомобиль или групповой) не использовался в течение двух и более суток, для гарантии чистоты топлива через каждый рукав прокачивают не менее 200 л топлива в резервуар для слива отстоя или отдельную емкость. Слитое топливо подвергают контрольному анализу и при положительных его результатах используют по прямому назначению.

Технологической картой установлен порядок исполнения работ по контролю средств заправки, контролю топлива на технической стоянке и по самой заправке ЛА, которые возложены на ИАС.

По прибытии автотопливозаправщика представители ИАС и авиатехнической части проверяют чистоту отстоя топлива, взятого из отстойников автотопливозаправщика, а также из фильтров-сепараторов, через которые прошло выданное на заправку топливо. Через 6 часов стоянки автотопливозаправщика повторно проверяется чистота топлива, взятого из его отстойника. Если используется групповой заправщик ЛА топливом, то проверяют отстой из его расходных резервуаров.

При положительных результатах контроля представители авиатехнической части и ИАС делают запись в контрольном талоне "Заправку разрешаю", указывают дату, время и ставят свою подпись. При наличии замечаний, которые

невозможно устранить на месте, или неправильно оформленной документации (контрольного талона, формуляра автотопливозаправщика, рабочего журнала группового заправщика) средства от заправки отстраняют, о чем делают запись в этих документах и докладывают по команде. Аналогично поступают при обнаружении загрязнений в топливе, которые не устраняются при дополнительном сливе отстоя. Авиационный техник перед заправкой и после нее проверяет чистоту отстоя, взятого из баков ЛА, а если необходимо – также из средств заправки после 10 мин. стоянки. Перед каждой заправкой авиационный техник проверяет соответствие маркировки средств заправки записи в контрольном талоне, чистоту и исправность раздаточных устройств и фильтрующих сеток, наличие записи в контрольном талоне "Заправку разрешаю", а также надежность заземления заправщика и ЛА.

В ходе заправки ЛА механик-водитель контролирует перепад давления в фильтре автотопливозаправщика, а начальник группового заправщика – в фильтр-сепараторе, и делает запись в журнале учета работы фильтров или рабочем формуляре заправочного агрегата. В случае резкого уменьшения перепада давления или повышения максимально допустимого перепада заправка запрещается. Причиной уменьшения перепада может быть разрыв чехла фильтра, негерметичность соединений, а причиной увеличения – забивка фильтра. Авиационный техник (механик) во время заправки ЛА следит за надежной работой средств заправки, герметичностью системы подачи топлива, исключением попадания пыли, дождя, снега в системы ЛА, контролирует количество выдаваемого топлива.

После заправки оформляется раздаточная ведомость на выданное топливо, проверяется запись в ней номера контрольного талона. Авиационный техник отбирает пробы из баков ЛА в количестве не менее 1,5 л из каждого расходного бака (или группы расходных баков). Опечатанные техником пробы хранят в ИАС до очередной заправки баков.

**11.5.5. Подготовка авиационных масел и технических жидкостей к выдаче на заправку.** На рис.11.4 показана схема оборудования *пункта выдачи масла* ( в том числе гидромасла) на аэродромном складе ГСМ. Начальным этапом подготовки масла и гидромасла к выдаче является его отстаивание в бочках и бидонах поставщика в течение 2-3 суток. Затем его перекачивают в расходную емкость. Насос при этом откачивает масло с уровня не ниже 50 мм от днища. Остаток сливают в бидон или ведро (несливаемый остаток до 0,5 л), отстаивают и аккуратно сливают в расходную емкость, оставив на дне 0,1-0,2 л отстоя. Выдачу масла из расходной емкости в средства заправки – маслозаправщики МЗ-66, агрегаты АМЗ-53, ЭГУ, УПГ и др. производят насосом или под давлением сжатого газа; допускается выдача и самотеком. Вход заборных трубок находится на высоте 30-50 мм от днища. Магистраль выдачи масла снабжена авиационным фильтром саржевого плетения ФГ-11 или ФГ-14 с тонкостью фильтрации 15-20 мкм. Давление в ней обеспечивается подачей сжатого воздуха от заправочного агрегата или от отдельного баллона с редуктором или же электрическим насосом ППР-1 (см. варианты на рис.11.4.).



При выдаче масла самотеком его фильтруют через шелковую фильтровальную ткань (от фильтра ТФЧ) с помощью воронки с сеткой, установленной в горловине заправочного агрегата. Расходная емкость в этом случае должна быть укреплена выше заправочного агрегата с наклоном 15-20°

При заправке авиационной техники масло проходит повторную фильтрацию на выходе из емкости заправочного средства в рукав заправочного крана. При заправке агрегатом АМЗ-53, если используется один сорт масла, то может быть обеспечена тройная фильтрация масла путем соединения напорных магистралей всех масляных емкостей в одну и установкой на ее выходе дополнительного самолетного фильтра. Фильтрация масла, подаваемого из расходных емкостей в цистерну автомобиля-маслозаправщика, производится через собственный фильтр маслозаправщика.

При каждом заполнении расходной емкости производят контрольный анализ масла, а перед каждой выдачей масла проверяют отсутствие воды и механических примесей в отстое, взятом через сливной кран или путем отбора донной пробы. Пробу отбирают в чистый сухой стеклянный цилиндр или стеклянную банку и разбавляют четырехкратным объемом отфильтрованного бензина-растворителя. Визуально убеждаются в отсутствии взвешенных или осевших на дно посторонних примесей. Методом «потрескивания» (нагревом масла в пробирке до 150°С) убеждаются в отсутствии воды: не должно быть щелчков, тиканья, а также вспенивания масла. При наличии воды и механических примесей выдача масла запрещается. Его дополнительно отстаивают и по возможности перекачивают в чистую расходную емкость.

**11.5.6. Устранение недостатков.** Чтобы избежать опасных ситуаций, связанных с некондиционными ГСМ, неисправными или неподготовленными средствами заправки, каждый случай отстранения средств наземного обслуживания полетов от заправки ЛА расследуется комиссией, назначаемой командиром части. Материалы расследования оформляются актом. Кроме выявленных причин несоответствия требованиям, в акте указывают, что нужно предпринять для обеспечения бесперебойной заправки авиационной техники.

Не реже двух раз в год комиссия из должностных лиц ИАС и авиационно-технической части проверяет соответствие технологии подготовки и выдачи ГСМ технологической карте.

## **11.6. ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО КАЧЕСТВУ И РАСХОДУ ГСМ**

**11.6.1. Система документации по качеству ГСМ.** Для планирования, контроля и учета мероприятий, обеспечивающих сохранение качества ГСМ и его контроль на всех этапах прохождения от поступления в воинскую часть до баков ЛА ведется достаточно сложная и трудоемкая документация. Она необходима для обеспечения ответственного и скрупулезного отношения персонала, связанного с применением ГСМ, ко всему выработанному практикой комплексу работ, необходимых для гарантии безопасности полетов. Прежде всего в воинской части ведутся документы по организации и планированию этих работ: план работы лаборатории ГСМ, план освежения ГСМ, годовой план проведения анализов ГСМ длительного хранения. При получении и использовании ГСМ

оформляются акты отбора проб ГСМ, и ведутся регистрации проб и анализа (учета качественного состояния) ГСМ.

На основании журнала анализов оформляют паспорта и контрольные талоны на ГСМ (см. п. 11.6.2.). В самой лаборатории ГСМ ее работу обеспечивают журнал проверки титров рабочих растворов, книга учета технического состояния, проверки и ремонта средств измерения, рабочие журналы лаборантов, журнал учета работы лаборатории. Для записи операций по подготовке и заправке ГСМ в баки ЛА ведутся журналы группового заправщика ЛА топливом, учета работы установленных на складе фильтров и фильтров-сепараторов, слива отстоя и проверки топлива на отсутствие воды и механических примесей.

Кроме того, ведутся журнал учета некондиционного горючего, график зачистки резервуаров, журнал ежедневных заданий.

Техник ЛА фиксирует данные по заправке ЛА в журнале подготовки к полету.

Заместитель командира авиационной части по ИАС участвует в составлении акта изменения качественного состояния ГСМ в случае выявления их некондиционности, а также дважды в течение года оформляет акт по проверке обеспечения и контроля качества ГСМ в авиационно-технической части (см. п. 11.3.3), в том числе ведения всей перечисленной документации.

На каждый расходный резервуар с хранящимся горючим, на каждую партию масла и специальной жидкости в лаборатории аэродромного склада ГСМ оформляется паспорт на основании записи в журнале анализов, который аналогичен по форме паспорту. В нем содержатся данные по всем показателям качества, предусмотренным стандартом. Исходные данные берутся из паспорта поставщика и материалов контрольного анализа, проведенного сразу после получения ГСМ. По истечении срока действия анализов производится новая запись в журнале или оформляется новый паспорт в соответствии с результатами свежего анализа.

При выдаче ГСМ в заправочные средства на основании паспорта или журнала анализов специалист лаборатории ГСМ оформляет контрольный талон на заправку самолетов, подтверждающий соответствие качества ГСМ по ГОСТ (ТУ). В контрольный талон записываются содержание ПВКЖ в топливе, фактическая плотность, замеренная ареометром при выдаче, подтверждается отсутствие воды в резервуаре, из которого оно взято, и удостоверяется чистота отстоя, проверенного после 10-минутной стоянки заполненного специального автомобиля.

При повторной выдаче ГСМ из того же резервуара в том же талоне делается новая запись. Если в средство заправки налито топливо из другого расходного резервуара или расходный резервуар долит, то контрольный талон изымается и выдается новый. Контрольные талоны, изъятые у водителей средств заправки, хранятся на складе ГСМ в течение одного года.

При использовании централизованного заправщика специалист лаборатории ГСМ записывает в контрольный талон результаты проверки донных проб из расходных резервуаров и из фильтров заправочных агрегатов после 30-минутного отстаивания.

Для учета выдачи паспортов и контрольных талонов лаборатория ГСМ ведет соответствующие журналы.

**11.6.2. Документация по расходу ГСМ.** Расход ГСМ производится по нормам расхода, утвержденным МО РФ. В связи с непрерывно возрастающей стоимостью ГСМ, точный учет расхода и контроль за соблюдением установленных норм является одной из важнейших функций ИАС. При заправке ЛА всеми видами ГСМ оформляются расходные ведомости. На основании этих ведомостей определяются расход и экономия ГСМ.

## **11.7. РАССЛЕДОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ И ОТКАЗОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ, СВЯЗАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГСМ**

**11.7.1. Причины авиационных происшествий, связанных с применением ГСМ.** Последствия неудовлетворительного качества топлива, масла и рабочей жидкости, которые могут привести к авиационным происшествиям, приведены на схемах рис. 3.2, 7.1, 10.1. Для четкого представления факторов, связанных с качеством ГСМ, при расследовании авиационного происшествия полезно составить подобную схему применительно к дефектному участку системы конкретного летательного аппарата.

Причинами авиационных происшествий может быть *внешнее загрязнение ГСМ, несоответствие сорта ГСМ* требуемому для данного вида техники, отклонение отдельных показателей качества ГСМ от норм ГОСТ или ТУ после *длительного хранения* или *примесь других ГСМ*. Во всех этих случаях неудовлетворительное качество ГСМ обнаруживается при полном анализе проб, взятых из уцелевших емкостей летательного аппарата (по 1,0-1,5 л каждая).

Отбор проб из баков и других характерных участков систем производится таким образом, чтобы исключить возможность загрязнения ГСМ, с точным указанием места и времени взятия пробы. При авариях, как правило, не берут проб ГСМ с земли, но если внутри систем ГСМ не сохранились, то по анализу пролитых ГСМ иногда удается установить их сорт (но не их качественные показатели). Желательно для сравнения иметь пробы или данные анализа ГСМ тех же партий со склада и из средств заправки. В топливе проверяется фактическое содержание ПВК жидкости и отдельно проводится анализ этой жидкости, взятой со склада.

По документации (паспорту поставщика, журналу анализов, контрольному талону, а также накладным, раздаточной ведомости и др.) определяется прохождение ГСМ от поставщика до ЛА с целью выявления возможности смешения с другими продуктами, вероятных участков загрязнения и т. д.

Однако следует иметь в виду, что несоответствие качества ГСМ, обнаруженное при анализе, не обязательно является причиной авиационного происшествия. Это связано с тем, что неудовлетворительное качество ГСМ зачастую проявляется в форме таких отказов, дефектов и неисправностей авиационной техники, которые могут быть вызваны и другими причинами. Кроме того, многие показатели качества ГСМ, регламентированные стандартом, практически не влияют на работу и надежность авиационной техники, например, промежуточные точки фракционного состава реактивного топлива, плотность авиационного масла. Только четкая цепочка взаимосвязанных явлений, установленная при расследовании авиационного происшествия, позволяет сделать правильный вывод о фактических последствиях неудовлетворительного качества ГСМ.

Формально неудовлетворительным качеством ГСМ считается отклонение его показателей от регламентируемых стандартом. Однако имеется еще целый ряд факторов, связанных с природой ГСМ, которые могут привести к отказам авиационной техники, например, быстрому износу наклонной шайбы и плунжеров топливного насоса из-за пониженной смазочной способности хорошо очищенного топлива, перегреву жаровых труб вследствие интенсивного излучения сажистого пламени, нарушениям в работе гидроустройств при расслоении рабочей жидкости, к которой примешалась жидкость другой природы, и т. д. Выявить такие факторы можно проведением дополнительных испытаний ГСМ, выходящих за установленный объем полного анализа. Так, при отказах и неисправностях, связанных с системой смазки, картину может прояснить спектральный анализ взятой из нее пробы масла, при вероятности смешения различных видов и сортов ГСМ в системах – испытание на совместимость; при разрушении камеры сгорания – определения люминометрического числа топлива и микропримесей металлов в нем, при повышенном износе топливного насоса – определение адсорбционных или смазочных свойств топлива.

**11.7.2. Организация расследования отказов авиационной техники, связанных с применением ГСМ.** Регламентация порядка расследования отказов авиационной техники, связанных с применением ГСМ, необходима для повышения объективности расследований с целью разработки эффективных мероприятий и рекомендаций по предупреждению повторения отказов.

Если в донесении об авиационном происшествии или в ходе работы комиссии возникает версия о причинной связи отказа с применением или качеством ГСМ, то в состав комиссии включают специалистов по химмотологии. При установлении такой связи ГСМ в составе инженерно-технической подкомиссии создается рабочая группа по исследованию качества и применения ГСМ.

До прибытия комиссии печатают пробы топлива, отобранные перед полетом, и получают письменные объяснения от лиц, связанных с подготовкой и заправкой ГСМ для данного полета. На основании полученной информации комиссия включает в программу исследований и схему причинно-следственных связей вопросы, относящиеся к применению и качеству ГСМ. Комиссия проводит анализ обстоятельств проявления отказа авиационной техники, связанных с применением ГСМ. Оценивается состояние средств хранения и заправки, состояние технической документации, соблюдение регламента применения ГСМ, степень влияния изученных факторов на возникновение и развитие отказа и аварийной ситуации. Отрабатываются рекомендации по устранению выявленных недостатков и предупреждению повторения отказов. Рабочей группой ГСМ руководит представитель службы горючего округа (авиационного соединения).

Все работы на авиационной технике, складах и других объектах проводятся с привлечением должностных лиц, непосредственно отвечающих за их эксплуатацию и обслуживание, в присутствии членов комиссии. Места отбора, количество, объем проб ГСМ, отстоев, отложений, методику их отбора, цель и объем исследования определяет комиссия.



При ограниченном количестве проб ГСМ, отстоев, отложений исследование проводят по наиболее важным показателям, позволяющим подтвердить или исключить предполагаемую версию о причине отказа. Исследования этих образцов проводят после завершения анализа всех остальных проб ГСМ. При необходимости проведения аналитических, лабораторных и других исследований председатель комиссии привлекает специализированные лаборатории ГСМ и научно-исследовательские учреждения.

Агрегаты, детали, пробы горючего, направляемые на исследования в НИУ или другие организации, отбирают в 2-дневный срок.

В случае проведения исследований одного и того же объекта в нескольких учреждениях все работы выполняются по согласованным между этими учреждениями программам и методикам, а по результатам работ выдается совместное заключение.

**11.7.3. Документация по расследованию.** На основании проведенных исследований рабочая группа составляет акт и представляет материалы в отчет комиссии, которые включают данные, предусмотренные соответствующей инструкцией, в том числе заключение о причине отказа, виновной стороне и непосредственном виновнике, а также мероприятия, необходимые для предупреждения аналогичных отказов. Акт подписывается всеми членами комиссии без исключения. Член комиссии, выразивший несогласие с содержанием или выводами акта, подписывается с пометкой "с особым мнением". Особое мнение с обоснованием причин несогласия излагается в виде отдельного письменного документа. Акт утверждается лицом, назначившим комиссию. В число адресов рассылки акта включаются командиры воинских частей и руководители предприятий промышленности, которым предстоит разрабатывать мероприятия по исключению отказов и восстановлению работоспособного состояния техники.

В случае вины завода-изготовителя или необходимости разработки дополнительных мероприятий по исключению отказов акт или выписка из него направляются соответствующим организациям.

## **11.8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНОСТРАННЫХ ГСМ**

**11.8.1. Общие принципы применения иностранных ГСМ.** Авиационные ГСМ иностранных марок рассматриваются как заменители отечественных сортов ГСМ. Поскольку отечественная авиационная техника разработана, испытана и внедрена в эксплуатацию на совершенно определенных сортах отечественных ГСМ, длительное применение на ней иностранных ГСМ даже более высокого качества, но неизбежно отличающихся от отечественных по составу и свойствам, может вредно сказаться на работе и надежности силовых установок. Поэтому применение иностранных ГСМ допускается как временная мера. Они могут быть использованы при условии одинаковой природы и соответствия требованиям отечественных стандартов по всем показателям качества, которые влияют на работу и надежность авиационной техники. При этом существенно не нормативное соответствие (вытекающее из норм иностранных спецификаций), а фактическое, определенное путем проведения *проверочного анализа*. Это связано с тем, что требования иностранных спецификаций к качеству по ряду показателей менее жесткие, чем требования ГОСТ (по темпе-

ратуре начала кристаллизации, содержанию серы и непредельных углеводородов, давлению насыщенного пара). По действительному же значению этих показателей может быть значительный "запас качества" и полное соответствие требованиям соответствующих ГОСТ.

В определенных условиях, если не имеется отечественных ГСМ, может оказаться целесообразным применение отдельных партий иностранных ГСМ с показателями, не удовлетворяющими нормам ГОСТ. В этом случае предусматриваются *ограничения по условиям применения* (погодным, по высоте полета, по режимам работы двигателей). Так, иностранные топлива с температурой начала кристаллизации минус 33-40°C зимой можно применять при температуре воздуха у земли не ниже минус 20°C и продолжительности полетов самолетов с кессонными баками не более 3 ч. Если температура начала кристаллизации топлива минус 46-50°C, то разрешается его применять при температуре воздуха у земли не ниже минус 30°C.

**11.8.2. Разрешение на использование иностранных ГСМ.** Основанием для использования ГСМ на конкретной авиационной технике являются химмотологические карты, в которых указаны пригодные для этой техники сорта иностранных ГСМ. В боевых условиях дополнительные конкретные указания по применению ГСМ иностранного производства определяются их ассортиментом, которым располагает противник и союзники. Находящиеся в исправных и опломбированных (опечатанных) резервуарах, цистернах и герметичной таре ГСМ иностранных фирм допускаются к применению инженером авиационной части при наличии паспортов качества, их соответствия требованиям спецификаций и совпадения результатов проверочного анализа с данными паспорта по каждой емкости в отдельности. Объем проверочного анализа примерно совпадает с максимальным объемом контрольного анализа отечественных ГСМ неизвестной даты выработки и включает также *проверку на совместимость* (смешиваемость с соответствующим отечественным сортом ГСМ).

Если иностранные ГСМ находятся в неисправной или вскрытой (неопломбированной, неопечатанной) емкости или таре, на них нет паспортов качества или результаты проверочного анализа не соответствуют паспорту, а также при подозрении в порче ГСМ проводится полный анализ проб из каждой емкости. Разрешение на использование таких ГСМ дает главный инженер вышестоящей инстанции.

*Запрещается* использовать на отечественной технике ГСМ из баков и систем иностранных самолетов и вертолетов. При заправке и дозаправке самолетов и вертолетов разрешается смешивать между собой взаимозаменяемые ГСМ отечественных и зарубежных сортов, если проверочным анализом подтверждена их совместимость. Исключением являются синтетические масла – при смешении друг с другом и с нефтяными маслами они могут выделять осадки или расслаиваться. На смесь отечественных ГСМ с зарубежными, уступающими им по отдельным показателям, распространяются все ограничения, предусмотренные для зарубежных сортов.

## **СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

по свойствам и техническим нормам качества топлив, смазочных материалов  
и технических жидкостей, предназначенных для летательных аппаратов  
и наземных средств их обслуживания

## 1. Реактивные топлива

№ п.п.	Показатели	ГОСТ 10227-86				ГОСТ 12308-89	
		Умеренной термостабильности		Широкая фракция	Термостабильные		
		ТС-1	Т-1	Т-2	РТ	Т-6	Т-8В
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> , не менее	780(775)	800	755	775	840	800
2	Фракционный состав, температура начала перегонки, не ниже	-	-	60	135	195	165
	не выше	150	150	-	155	-	-
	10 % перегоняется при температуре, °С, не выше	165	175	145	175	220	185
	50 % -----//-----	195	225	195	225	255	-
	90 % -----//-----	230	270	250	270	290	-м.
	98 % -----//-----	250	280	280	280	315	280
3	Давление насыщенных паров, гПа, не более	-	-	133	-	-	-
4	Температура вспышки в закрытом тигле, °С не ниже	28	30	-	28	62	45
5	Температура начала кристаллизации, °С не выше	-60; -50*	-60	-60; -50*	-55; -50*	-60	-50
6	Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при температуре 20 °С, не менее	1,30(1,25)	1,50	1,05	1,25	до 4,5	до 5
	-----//----- -40 °С, не более	8	16	6	16	60	16
7	Удельная теплота сгорания, кДж/кг, не менее	43120(42900)	42900	43100	43120	42900	42900
8	Высота некоптящего пламени, мм, не менее	25	20	25	25	20	20
9	Люминометрическое число, не ниже	-	-	-	50	45	50
10	Йодное число, г йода/100 г топлива, не более	2,5 (3,5)	2,0	3,5	0,5	0,8	0,9
11	Термостабильность в статических условиях при 150 °С, содержание осадка, мг/100 мл топлива не более	18	35	18	6	6	6
	содержание растворимых смол, мг/100 мл топлива	-	-	-	30	60	-
	содержание нерастворимых смол, мг/100 мл топлива	-	-	-	3	Отс.	-
12	Термостабильность динамическим методом при 150-180 °С						
	перепад давления на фильтре за 5 ч, кПа, не выше	-	-	-	10	10	10
	отложения на подогревателе, баллы, не более	-	-	-	2	1	1
13	Содержание фактических смол, мг/100 мл, не более	3(5)	6	5	4	4	4
14	Кислотность, мг КОН/100 мл топлива, не более (в пределах)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4-0,7	0,4-0,7
15	Испытания на медной пластинке (100°С в течение 3ч)	выдерживает					
16	Массовая доля общей серы, %, не более	0,20(0,25)	0,10	0,25	0,10	0,05	0,10



1	2	3	4	5	6	7	8
17	Массовая доля меркаптановой серы, %, не более	0,003(0,005)	-	0,005	0,001	Отс.	0,001
18	Массовая доля ароматических углеводородов, %, не более	22	20	22	22	10	22
19	Массовая доля нафталиновых углеводородов, %, не более	-	-	-	1,5	0,5	2,0
20	Зольность, %, не более	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
21	Удельная электропроводимость с присадкой "Сигбол", пСм/м при температуре заправки техники, не менее при температуре 20 °С, не более	50	-	50	50	-	50
		600	-	600	600	-	600
22	Содержание механических примесей и воды	отсутствие					
В скобках приведены значения показателей для ТС-1 первого сорта, отличные от значений для высшего сорта. *Кроме района ІА							
Топливо Т-1с отличается от топлива Т-1 по п. 1 - 810, п. 11 – 6, п. 17 – 0,001							

## 2. Зарубежные реактивные топлива

№ п.п.	Показатели	Умеренной термоста- бильности	Термостабильное		Широкая фракция		Нелетучее
		AVTUR Jet A-1	JP-7	JP-8	AVTAG JP-4	Jet B	AVCAT JP-5
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> , не менее не более	771 830	779 806	771 830	748 798	748 798	784 841
2	Фракционный состав: температура начала перегонки, °С, не ниже Перегоняется при температуре, °С, не выше 10 % не выше 20 % не выше 50 % не выше 90 %	- 205 - - -	182 196 206 - 260	- 204 - 232 -	- - 145 190 245	- - 143 188 243	- 204 - - -
3	Температура, вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	38	60	40-66	-	-	60
4	Давление насыщенных паров, гПа, не более	-	-	-	137-207	-	-
5	Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при температуре -34 °С, не менее -20 °С, не более	- 8,0	16 -	15 -	- -	- -	16,5 -
6	Температура, °С, начала кристаллизации, не выше	-47	-43,3	-48	-58	-50	-46
7	Удельная теплота сгорания, кДж/кг, не менее	42800	-	42600	42800	42800	42370
8	Высота некоптящего пламени, мм, не менее	25	-	25	20	25	19
9	Люминометрическое число, не ниже	45	-	45	-	45	50
10	Термическая стабильность по CFR Coker: перепад давления на фильтре за 5 ч. испытания, гПа, не более отложения на подогревателе, баллы, не более	101,3 3	101,6 3	101,6 3	101,6 3	101,6 3	101,6 3
11	Массовая доля, ароматических углеводородов, %, не более	22	5	25	25	20	25
12	Массовая доля, нафталиновых углеводородов, %, не более	3,0	-	3,0	-	3,0	-
13	Массовая доля, общей серы, %, не более	0,3	0,1	0,3	0,4	0,3	0,4
14	Массовая доля, меркаптановой серы, %, не более	0,003	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001
15	Кислотность, мг КОН/100 мл топлива	0,015	-	0,015	0,1	-	0,015
16	Содержание фактических смол, мг/100 мл, не более	7	-	7	7	7	7
17	Взаимодействие с водой, баллы, не более	-	-	-	1В	1В	-
18	Зольность, %, не более	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003

1	2	3	4	5	6	7	8
19	Содержание механических примесей	-	-	1,0	1,0	-	1,0
20	Содержание ПВК жидкости, % объемных	0,15	0,15	0,15	0,15	-	0,15
21	Удельная электропроводимость с присадкой ASA-3, пСм/м: при температуре заправки техники 20 °С, при 20 °С	не менее 50 не более 450	- -	- -	50 600	50 300	- -

### 3. Авиационные бензины

№ п.п.	Показатели		Б-95/130 ГОСТ 1012-72	Б-91/115 ГОСТ 1012-72	Б-92 ТУ 38.401-58-47-92
1	Содержание тетраэтилсвинца, г/1 кг бензина,	не более	3,1	2,5	2,0
2	Детонационная стойкость: октановое число по моторному методу, сортность на богатой смеси ,	не менее не менее	95 130	91 115	91,5 -
3	Удельная теплота сгорания низшая, МДж/кг,	не менее	42,75	42,95	42,74
4	Фракционный состав: температура начала перегонки, °С, перегоняется при температуре, °С, 10 % -----//----- 50 % -----//----- 90 % -----//----- 97,5 % -----//-----	не ниже  не выше не выше не выше не выше	40 82 105 145 180	40 82 105 145 180	40 82 105 145 180
5	Давление насыщенных паров, кПа		33,3-45,4	29,3-48,0	29,3-48,0
6	Кислотность, мг КОН/100 мл,	не более	0,3	0,3	1,0
7	Температура начала кристаллизации, °С,	не выше	-60	-60	-60
8	Йодное число, г йода/100 г бензина,	не более	6,0	2,0	2,0
9	Массовая доля ароматических углеводородов, %,	не более	35	35	Не нормируется.
10	Содержание фактических смол, мг/100 мл бензина,	не более	4,0	3,0	3,0
11	Массовая доля серы, %,	не более	0,03	0,03	0,05
12	Цвет		Желтый	Зеленый	Зеленый
13	Массовая доля параоксидифениламина, %		0,002-0,005	0,002-0,005	-
14	Период стабильности, ч,	не менее	12	12	8



#### 4. Автомобильные бензины.

№ п.п.	Показатели бензинов (ГОСТ 2084–77)		А-72	А-76 неэтил.	А-76 этил.	АИ-91	АИ-93	АИ-95
1	Детонационная стойкость:	октановое число моторный метод, не менее исследовательский метод, не менее	72	76	76	82,5 91	85 93	85 95
2	Содержание свинца, г/л , не более		0,013	0,013	0,17	0,013	0,013	0,013
3	Фракционный состав: температура начало перегонки бензина, °С, не ниже:		35	35	35	35	35	30
	летнего							
	зимнего							
	10 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:		70	70	70	70	70	75
	летнего							
	зимнего		55	55	55	55	55	55
	50 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:		115	115	115	115	115	120
	летнего							
	зимнего		100	100	100	100	100	105
	90 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:		180	180	180	180	180	180
	летнего							
	зимнего		160	160	160	160	160	160
	Конец кипения бензина, °С, не выше:		195	195	195	205	205	205
	летнего							
	зимнего		185	185	185	195	195	195
4	Давление насыщенных паров бензина, кПа: летнего, не более		66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
	зимнего		66,7-93,3	66,7-93,3	66,7-93,3	66,7-93,3	66,7-93,3	66,7-93,3
5	Кислотность, мг КОН/100 мл, не более		3,0	1,0	3,0	3,0	0,8	2,0
6	Содержание фактических смол, мг/100мл, не более:		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	на месте производства							
	на месте потребления		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
7	Индукционный период на месте производства бензина, мин, не менее		600	1200	900	900	1200	900
8	Массовая доля серы, %, не более		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

## 5. Дизельные топлива

№ п.п.	Показатели дизельного топлива (ГОСТ 305–82)	Норма для марок		
		Л	З	А
1	Цетановое число, не менее	45	45	45
2	Фракционный состав: 50 % перегоняется при температуре, °С, не выше 90 % перегоняется при температуре (конец перегонки), °С, не выше	280 360	280 340	255 330
3	Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,0-6,0	1,8-5,0	1,5-4,0
4	Температура застывания, °С, не выше, для климатической зоны: умеренной холодной	-10 -	-35 -45	- -55
5	Температура помутнения, °С, не выше, для климатической зоны: умеренной холодной	-5 -	-25 -35	- -
6	Температура вспышки в закрытом тигле для дизелей общего назначения, °С, не ниже:	40	35	30
7	Массовая доля серы, %, не более, в топливе вида I вида II	0,2 0,5	0,2 0,5	0,2 0,4
8	Массовая доля меркаптановой серы, %, не более Содержание фактических смол, мг/100 мл топлива, не более	0,01 40	0,01 30	0,01 30
9	Кислотность, мг КОН/100 мл топлива, не более	5	5	5
10	Йодное число, г йода/100 г топлива, не более	6	6	6
11	Зольность, %, не более	0,01	0,01	0,01
12	Коксуемость 10 %-ного остатка, %, не более	0,20	0,30	0,30
13	Коэффициент фильтруемости, не более	3	3	3
14	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> , не более	860	840	830

## 6. Криогенные топлива

№ п.п.	Показатели	Водород	метан
Химический состав			
1	Молекулярная формула	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
2	Молекулярная масса	2,0159	16,043
3	Массовая доля углерода	–	0,74869
4	Массовая доля водорода	1	0,25131
5	Массовая доля параводорода нормальная	0,25	–
6	Массовая доля параводорода при 20 К	0,988	–
Температура фазовых переходов, К,			
7	кипения при давлении 0,1013 МПа	20,3	111,7
8	замерзания (плавления) при 0,1013 МПа	11,2	90,7
9	тройной точки (при давлении, кПа,	13,8 7,18	90,7 11,72)
10	критическая (при давлении, МПа,	33,2 1,298	190,8 4,3)
11	начало выделения твердой фазы при нагреве	–	723
Плотность, кг/м <sup>3</sup> ,			
12	жидкого топлива (при температуре, К	70,8 20,3	422 111,7)
13	твердого топлива (при температуре, К	87,0 11,2	452 91)
14	50%-ной шуги (при температуре, К	78,1 11,2	437 91)
15	газа при 0,1013 МПа, 293 К	0,0846	0,717
16	критическая	30,7	163,5
Энергетические характеристики			
17	Теплота сгорания низшая, МДж/кг	120,0	50,1
18	Тепловой эффект сгорания криотоплива, МДж/кг	116,1	48,8
19	Тепловой эффект сгорания 50%-ной шуги, МДж/кг	116,0	48,8
20	Энергоемкость жидкого топлива, МДж/м <sup>3</sup>	8220	20594
21	Энергоемкость 50%-ной шуги, МДж/м <sup>3</sup>	9060	21301
Переходные тепловые эффекты, кДж/кг			
22	Теплота испарения при температуре кипения	457	511
23	Теплота плавления при температуре плавления	58,7	5,9
24	Теплота ортопараконверсии	699	–
25	Тепловой эффект реального ортопараперехода	524	–
26	Хладоресурс (при нагреве до температуры, К	13030 923	2830 623)

№ п.п.	Показатели	водород	метан
Термодинамические показатели			
27	Удельная газовая постоянная, Дж/кг·К	4124,4	518,26
28	Теплоемкость газа (0,1013 МПа, 293 К), кДж/кг·К	14,3	2,22
29	Теплоемкость жидкого топлива, кДж/кг·К	9,63	3,41
30	Изменение энтальпии от Ткип до 293 К, кДж/кг	3456	800
31	Энтальпия жидкого топлива, кДж/кг	-3913	-812
Продукты стехиометрического горения в воздухе			
32	Стехиометрический коэффициент	34,38	17,21
33	Массовая доля H <sub>2</sub> O	0,2526	0,1224
34	Массовая доля CO <sub>2</sub>	0	0,1506
35	Удельная газовая постоянная, кДж/кг·К	338,4	300,7
36	Теплоемкость при 0,1013 МПа, 293 К, кДж/кг·К	1,248	1,111
Характеристики горения в воздухе			
37	Теплопроизводительность, МДж/кг	3,39	2,75
38	Калориметрическая температура, К	2508	2398
39	Нормальная скорость пламени, м/с	2,59	0,34
40	Пределы горения: по составу смеси, α по объемной доле в воздухе, %	0,14-10,10 4-7	0,59-1,99 5-15
41	Температура самовоспламенения, К	858	815
42	Индекс черноты диффузионного пламени	0	5
Некоторые физические свойства			
43	Динамическая вязкость жидкого топлива, мкПа·с (при температуре, К	12,6 20,3	102,8 111,7)
44	Коэффициент диффузии в воздух, при, 293 К, мм <sup>2</sup> /с	66	23
45	Скорость звука в жидком топливе, м/с (при температуре, К	1114 20,3	1534 111,7)
46	Скорость звука в газе при 293 К, м/с	1305	443



## 7. Масла турбореактивных двигателей

№ п.п.	Показатели			МС-8П	МС-8РК	ИПМ-10		ВНИИ НП 50-1-4ф	ВНИИ НП 50-1-4у	36/1-КУА	ПТС-225	ВТ-301
				ОСТ 38.101163-78	ОСТ 38.01387-85	ТУ 38.101657-85	ГОСТ 13076-86	ТУ 38.401286-82	ТУ 38.101384-78	ТУ 38.401337-84	ТУ 38.101657-85	
1	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при температуре 200 °С, при температуре 100 °С, при температуре 50 °С, при температуре –40 °С,			не менее не менее не более не более	- - 8,0 4000	- - 8,0 5000	- 3,0 - 2000	- 3,2 - 2000	- 3,2 - 2700	- 3,6 - 3600	1,25 - - 6500	1,25 8,5 - 800
2	Смазочные свойства,	критическая нагрузка заедания Рк, Н, диаметр пятна износа dк, мм,		не менее не более	500 0,5	- -	710 -	- -	750 0,45	790 -	0,5	- -
3	Температура вспышки, °С,		в закрытом тигле в открытом тигле	не ниже не ниже	150 -	150 -	- 190	- 204	- 204	- 195	- 235	- 260
4	Испаряемость,	при температуре, °С / в течение ч			150/3	150/3	175/5	225/5	-	-	225/5	225/5
		скорость подачи воздуха л/мин			90	90	15	1	-	-	1	1
		потери от испарения,%, вязкость при –40 °С после испытания,мм <sup>2</sup> /с, не более		не более	10 5000	10 6000	8,0 3000	10 3000	- -	- -	10 +50%	- -
5	Температура застывания, °С,			не выше	-55	-55	-60	-60	-60	-60	-60	-60
6	Термоокислительная стабильность, °С/ч				150/50	175/50	200/50	175/72	200/50	200/50	225/50	250/50
	Кислотное число окисленного масла, мг КОН/ на 1 г, не более				0,4	0,7	8,0	2,0	4,5	8,0	-	0,3
	Массовая доля осадка не растворимого в изооктане, % не более				0,15	0,15	0,4	-	0,15	0,3	0,15	0,12
	Вязкость окисленного масла, мм <sup>2</sup> /с, не более, при 100 °С				-	-	-	+7%	-	9,0	-	10,0
	при 50 °С при -40 °С				10,0 5500	11,0 6750	- -	- -	- 3200	- -	- 3000	- -
7	Коррозия на пластинках, г/м <sup>2</sup> ,		из стали ШХ-15	отс.	отс.	отс.	-	±0,1	Отс.	-	Отс.	
			из алюминиевого сплава АК-4	отс.	отс.	отс.	±0,2	±0,1	отс.	-	Отс.	
			из меди М-1, М-2	±0,2		±0,2	±0,4	±0,1	-	-	±2	
8	Содержание серы, % ,			не более	0,6	0,6						
9	Кислотное число,			не более	0,03	0,15	0,05	0,22	0,25	от3,2 до 4,2	0,2	0,33
10	Зольность, %,			не более	0,008			0,1	0,1	-	-	-
11	Содержание водорастворимых кислот и щелочей				Отсутствие							
12	Содержание механических примесей				Отсутствие							
13	Содержание воды				Отсутствие					Следы	Отсутствие	
14	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> ,			не более	875	900	820 не менее	926	928	от980 до997	1000	от1090 до1110

## 8. Масла турбовинтовых двигателей и силовых установок вертолетов

№ п.п.	Показатели			МН-7,5	СМ-4,5	СМ-8	СМ-11,5	Б-3В	ЛЗ-240	ТСгип
1	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при температуре 200 °С, не менее			7,5	4,3-4,7	7,0-9,0	9,5-13,5	5,0	4,8	20,5-32,4
	при температуре -30 °С, не менее			750	-	-	-	3500	-	-
	при температуре -40 °С, не более			-	25000	-	-	12500	12500	-
2	Смазочные свойства:	критическая нагрузка заедания Р <sub>к</sub> , Н, диаметр пятна износа d <sub>к</sub> , мм,	не менее не более	824 0,5	490 0,47	490 0,38	540 0,4	873 -	883 0,5	- -
3	Температура вспышки, °С,	в закрытом тигле в открытом тигле	не ниже не ниже	150 -	138 -	142 -	150 -	- 235	- 235	- -
4	Испаряемость при 175°С, %			15	-	-	-	-	-	-
5	Температура застывания, °С			-53	-35	-30	-20	-60	-58	-20
6	Коксуемость, %			0,20	0,15	0,20	0,20	0,45	0,45	-
7	Термоокислительная	температура испытания, °С,		175	120	120	120	200	200	-
		продолжительность испытания, ч,		50	10	10	10	10	50	-
		массовая доля осадка, %, не более		0,20	0,15	0,12	0,15	0,10	0,10	-
		кислотное число окисленного масла, мг КОН/ на 1 г, не более		1,0	0,3	0,7	0,4	1,5	1,5	-
	стабильность	вязкость окисленного масла, мм <sup>2</sup> /с при 100 °С, не менее		10,0	10,0	-	-	6,0	6,0	-
		при -50 °С, не менее		11500	-	-	-	-	-	-
		при -40 °С, не менее		-	5500	-	-	20000	20000	-
8	Коррозия на пластинках, г/м <sup>2</sup> ,	из стали ШХ-15		отс.	отс.	-	-	отс.	отс.	выдерживает
		из алюминиевого сплава АК-4		±0,2	отс.	-	-	отс.	отс.	-
		из меди М-1, М-2		±0,5	0,2	-	-	0,4	отс.	потемнение
9	Содержание серы, %, не менее			-	-	-	-	-	-	1,5
10	Кислотное число, не более			0,08	0,05	0,07	0,1	4,4...5,5	0,5	-
11	Зольность, %, не более			0,005	0,05	0,05	0,05	-	-	-
12	Содержание водорастворимых кислот и щелочей			Отсутствие						
13	Содержание механических примесей			Отсутствие						0,10
14	Содержание воды			Отсутствие				Следы	Следы	Отс.
15	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> , не более			900	до800 от900	870	870	от990 до997	от980 до1020	-

## 9. Зарубежные масла авиационных ГТД

№ п.п.	Показатели		Синтетические масла			Минеральные масла			
			Turbo Oil-300 для ТРД	MIL-L-23699B для ГТУ вертолета	Turbo Oil-750 для ТВД	Turbo Oil-1 для ТРД	Turbo Oil-2 для ТРД	Turbo Oil-3 для ТРД	Turbo Oil-9 для ТРД
1	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с	при температуре 99 °С, не менее	3,0	5,0	7,5	-	-	-	от 8,7 до 9,3
		при температуре 38 °С, не менее	-	25,0	-	5,0	10,0	13,0	-
		при температуре -40 °С, не более	-	13000	13000	-	3000	-	-
		при температуре -54 °С, не более	13000	-	2600	-	-	-	-
2	Стабильность вязкости при 38°С за 250 циклов прокачки при 52°С %, не более		-	-4	±2	-	-	-	-
3	Температура вспышки, °С в закрытом тигле, не ниже		-	-	-	107	132	143	-
	в открытом тигле, не ниже		204	-	216	-	-	-	210
4	Испаряемость при 204 °С за 6,5ч, %, не более		35	11	-	-	-	-	-
5	Температура застывания, °С, не выше		-59	-54	-48	-59	-57	-46	-29
6	Термоокислительная стабильность	при температуре, °С	175	175	140	121	121	121	121
		продолжительность испытания, ч	72	72	72	168	168	168	168
		изменение вязкости, %, не более							
7	Коррозия за 72ч при 175°С из стали, серебра, алюминия		-5 +15	-5 +15	±5	-5 +20	-5 +20	-	-
	(потеря массы пластинки), мг/см <sup>2</sup> , из магния		±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	-	-
	из меди		±0,4	±0,4	-	-	-	-	-
	из свинца (за 1ч)		0,03	-	-	-	-	-	-
8	Испытание на медной пластинке при 100 °С, баллы		-	-	-	1	1	1	1
9	Кислотное число, мг КОН на 1 г, не более		0,3	0,5	-	0,1	0,1	0,3	0,1
10	Зольность, мг/л, не более		-	1,0	-	-	-	-	
11	Содержание водорастворимых кислот		-	-	Отсутствие	-	-	-	Отсутствие
12	Содержание механических примесей, см <sup>3</sup> на 100мл, не более		0,0025	10*	-	0,0025	0,0025	-	-
13	Набухание синтетической резины, %		15-30	5-25	10-25	-	-	-	-
14	Испытание на вспенивание		Выдерживает	-	Выдерживает	-	-	-	-
15	Внешний вид		Прозрачное, однородное, не содержащее осадка, частиц и нерастворенной воды						
16	Цвет по шкале ASTM, не более		3	-	-	5,5	5,5	-	-
17	Совместимость с другими маслами		Выдерживает	-	Выдерживает	-	-	-	-

\* нерастворимых

## 10. Масла поршневых двигателей

№ п.п.	Показатели		Авиационные	Автотракторные				
			МС-20 ГОСТ 21743-76	М-6з/12Г1	М-5з/10Г1	М-4з/6В1	М-8В	М-6з/10В
1	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с	при температуре 100 °С, не менее	20,5	12	10-11	5,5-6,5	7,5-8,5	9,5-10,5
		при температуре 0 °С, не более	-	-	-	-	1200	-
		при температуре -18 °С, не более	-	10400	-	1100-2600	-.	9000
		при температуре -30 °С, не более	-	-	-	11000	-	-
2	Индекс вязкости, не менее		80	115	120	125	93	120
3	Массовая доля механических примесей, %, не более		отсутствие	0,015	0,015	0,02	0,015	0,02
4	Содержание воды		отсутствие	следы				
5	Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже			210	200	165	207	190
6	Температура застывания, °С, не выше		-18	-30	-38	-42	-25	-30
7	Содержание активных элементов, %, не менее,	кальция	-	0,23	0,2	-	0,16	-
		бария	-	-	-	-	-	-
		цинка	-	-0,10	0,12	-	0,09	-
		фосфора	-	-	-	-	0,09	-
8	Коррозионность на пластинках из свинца, г/м <sup>2</sup> , не более		20	отсутс.	-	5,0	10,0	4,0
9	Моющие свойства по ПЗВ, баллы, не более		-	0,5	-	1,0	0,5	0,5
10	Щелочное число, мг КОН/г, не менее		-	7,5	5,0	5,5	4,2	5,5
11	Зольность сульфатная, %, не более		0,003 (общая)	1,3	0,9	1,3	0,95	1,3
12	Коксуемость		0,29	-	-	-	-	-
13	Стабильность по индукционному периоду осадкообразования (ИПО)	15ч.	-	-	-	выдерж.	-	-
		20ч.	-	-	-	-	-	-
		30ч.	выдерживает	-	-	-	выдерживает	-
14	Цвет, ед. ЦНТ, без разбавления, не более		-	7,5	5,0	-	-	-
	с разбавлением 15:85,		-	-	-	3,0	3,5	3,0
15	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> , не более		897	900	900	880	905	890

## 11. Пластичные смазки авиационной техники

			Для различных узлов трения		Для подшипников колес		Для узлов трения с повышенной нагрузкой		Для узлов трения с повышенной температурой		Уплотнительная	Защитная
№ п.п.	Показатели		ВНИИНП-286М ЭРА  ТУ 38101950	ЦИАТИМ-201  ГОСТ6267-74	ВНИИНП-261 САП-ФИР ТУ 38401341-81  ГОСТ5573-67	НК-50  ТУ 38	ВНИИНП-254 АТЛАНТА  ТУ 38	ЦИАТИМ-203  ГОСТ8773-73	ЦИАТИМ-221  ГОСТ9433-80	ПФМС-4с  ТУ 6.02.917-79	БУ бензиноупорная  ГОСТ7171-78	ПВК пушечная  ГОСТ1353-783
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Состав	жидкая основа	Масло ИПМ-10	Масло МВП	Смесь синтетических масел	Масло МК-22	Смесь синтетических масел	Трансформаторное масло	Полисилоксановая	Полифенил метилсилоксановая	Окисленное касторовое масло	Дизельное масло ДС-11
		загуститель	Стеарат лития	Стеарат лития	Стеарат ацетат кальция	Натриевое мыло	Литиевое мыло осерненного солидола и саломаса	Стеарат ацетат кальция	Фталоцианин	Цинковое мыло касторового масла	Петролатум и церезин	
		добавки	Проив задир, коррозии окисления	Дифенил амин	Фталоцианин, антиоксидант	Коллоидный графит	металлоплакирующие присадки	Трифенил фосфат	Антиоксидант	Тонкодисперсный графит	Глицерин	Антиоксидант
2	Температурный диапазон применения, °С, в пределах		-60 120	-60 90	-40 200	-15 180	-60 150	-50 100	-60 150	-30 300	-10 40	-50 50
3	Максимальная температура, кратковременно, °С,		180	140	250	200	200	-	-	500	-	-
4	Температура каплепадения, °С, не ниже		180	175	250	200	165	160	200	-	60	55
5	Предел прочности при 20 °С, гПа, в пределах (в скобках не менее)		2,0 4,0	3,5 5,0	2,4 4,2	7,0 12,0	3,0 4,0	3,5 7,0	2,5 4,5	1,0 2,0	(25)	10 25
6	Вязкость при 0 °С и 10с <sup>-1</sup> , гПа·с, (в скобках не менее) в пределах		(1,15)	(11 при -50°С)	0,7 1,4	(10,0)	0,5 1,8	(10 при -50°С)	0,8 2,0	2,0 2,5	(21 при 20°С)	15 40
7	Пенетрация при 25 °С, мм·10 <sup>-1</sup> , в пределах		310 370	265 310	265 225	170 225	310 340	250 300	280 360	- -	30 80	- -
8	Противозадирные свойства нагрузка заедания, Н, не менее		-	280	-	650	-	360	280	-	-	560



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9	Коллоидная стабильность, % выделенного масла, не более	35	26	5	7	25	10	7	1,6	1,2	4
10	Испаряемость при 150 °С за 1ч, %, не более	-	25(при 120°С)	-	15(при 200°С)	-	-	1	-	6	0
11	Стабильность против окисления, мг КОН на 1 г, не более	-	3	-	3	-	3	0,04	-	-	1
12	Испытания на коррозию	выдерживает									
13	Содержание серы, % , не менее	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-
14	Содержание свободной щелочи в пересчете на мг NaOH на 1г, не более	-	0,1	-	0,1	-	0,1	0,08	-	отс.	
15	Содержание механических примесей, % не более	отсутствие									
16	Содержание воды, %, не более	-	отс.	-	следы	-	отс.	-	-	2,0	отс.
17	Растворимость в воде	нерастворимы			растворимы	нерастворимы					
207	растворимость в углеводородах	-	растворима	-	-	-	-	-	-	нерастворима	-
18											
19	Цвет	Светло-желтый светло-коричневый	Желтый	Черно-зеленый	Голубой	Темно-коричневый	-	Светло-желтый светло-коричневый	Черный	Коричневый	Желто-коричневый

## 12. Пластичные смазки автотракторной техники

206

№ п.п.	состав (в качестве жидкой основы используется минеральное масло смазка)	ШРУС-4	ШРБ-4	Фиол-2у	Литол-24	№158	1-13	ЯНЗ-2	УСс-А графит- ная	УСс- автосто- мобильный
		Литиевое мыло 12- оксистеари- новой кисло- ты 10% ди- сульфида молибдена	Бариевое мыло	Литиевое мыло 12- оксистеари- новой кисло- ты	Литиевое мыло окси- стеариновой кислоты	Литиево- кальциевое мыло на основе фта- лоцианина меди	Натриевое мыло ми- неральное масло	Кальцие- вое мыло мине- ральное масло	Кальцие- вое мыло и 10% графита, мине- ральное масло	Кальцие- вое мыло мине- ральное масло
1	Пенетрация при 25, °С, мм 10 <sup>-1</sup> не менее (в пределах)	250-280	265-295	255-295	220-250	305	-	-	250	-
2	Температура каплепадения, °С, не ниже	190	200	180	185	120	120	150	77	-
3	Вязкость при среднем градиенте скорости деформации 10с <sup>-1</sup> , Па·с, не более	250 (0°С)	800	170 (0°С)	280 (0°С)	400(0°С)	-	-	-	-
4	Предел прочности на сдвиг, Па, не менее	150 (80°С)	200	100 (80°С)	200 (80°С)	-	1,5(50°С)	1,8(50°С)	-	2,0(50°С)
5	Коллоидная стабильность, % выде- лившегося масла, не более	16	10	12	12	-	20	-	5	-
6	Массовая доля свободной щелочи в пересчете на NaOH, %, не более	0,1	-	0,1	0,1	-	0,2	0,2	-	0,2
7	Массовая доля свободных органи- ческих кислот в пересчете на олеи- новую кислоту, %, не более	отсутствуют								
8	Трибологические характеристики при 20±5°С, Н- нагрузка сварива-									

	ния, Рс, не менее - нагрузка критическая, Рк, не менее - индекс задира, Из, не более	5000 1000 55	1960 560 294	1960 980 48						
9	Коррозионное воздействие на металл	выдерж. (сталь)	выдерж.	выдерж. (медь)	выдерж. (медь)	выдерж. (медь)				
10	Массовая доля воды, %, не более	отсутствует	следы	отсутствует	0,05	отсутствует	0,75	0,5	3	2,5
11	Содержание механических примесей	отсутствуют	0,15	отсутствуют	220-250	отсутствуют				0,3

### 13. Гидравлические жидкости

№ п.п.	Показатели	АМГ-10 ГОСТ 6794-75	7-50С-3 ГОСТ 20734-75	НГЖ-4 ТУ-38 101740-80
1	Внешний вид	прозрачная однородная		
2	Цвет	красный	желтый	фиолетовый или синий
3	Вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при 200 °С, не менее -----//----- при 50 °С, не менее -----//----- при 20 °С, не менее -----//----- при -50 °С, не более -----//----- при -55 °С, не более -----//----- при -60 °С, не более	- 10 - 1250 - -	1,3 - 22 - - 4200	- 8,7 - - 3900 -
4	Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	92	200	165
5	Температура начала кипения, °С, не ниже	200	-	-
6	Температура застывания, °С, не выше	-70	-70	-60
7	Кислотное число, мг КОН на 1г, не более	0,05	0,10	0,08
8	Стабильность против окисления продолжительность испытания, ч температура испытания, °С вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при 50 °С, не менее -----//----- при 50 °С, не более -----//----- при 20 °С, не более -----//----- при -50 °С, не более -----//----- при -55 °С, не более -----//----- при -60 °С, не более кислотное число, мг КОН на 1г, не более	168 100 9,5 - - 1500 - - - 0,08	30 200 - - 26 - - 4500 0,8	100 100 - 10,5 - - 4500 - 0,15
9	Коррозия металла, мг/см <sup>2</sup> , не более	±0,1	±0,1	±0,1
10	Плотность жидкости при 20 °С, не более в пределах	850 -	- 930-940	- 1060-1080
11	Водорастворимые кислоты и щелочи	отсутствуют		
12	Механические примеси, %, не более	0,003	0,002	отсутствуют
13	Содержание воды, % не более	отсутствует		
14	Контактирующая газовая среда	до 125°С воздух, выше азот	азот	воздух или азот
15	Рабочие температуры, °С, не ниже не выше кратковременно, не выше	-60 125 150	-60 175 200	-50 100 125
16	Самовоспламеняется при температуре плиты, °С, не ниже	285	320	630

## 14. Антиобледенительные жидкости

№ п.п.	Показатели	Спирт этиловый ректификованный ГОСТ 18300-72	85% спирта, 15% глицерина	"Арктика" ТУ 6 02955-74
1	Внешний вид	Прозрачная однородная		
2	Цвет	Бесцветная		Слабожелтый
3	Плотность при 20 °С	803,8	867	1071...1080
4	Температура кристаллизации, °С	-114	Ниже -70	-37
5	Температура кипения, °С	78,13	-	-
6	Температура вспышки, °С	12	12	-
7	Поверхностное натяжение при 20 °С	23	26	35
8	Реакция среды, pH	-	-	8-9
9	Содержание основного компонента, %	95,5-96,2	85	52
10	Проба на чистоту серной кислотой	Выдерживает		
11	Механические примеси	Отсутствие		

## 15. Огнегасительные составы

№ п.п.	Показатели	фреоны (хладоны)		Диоксид углерода ГОСТ 8050-85
		114 В2	12 В1	
1	Молекулярная формула	$C_2F_4Br_2$	$CF_2ClBr$	$CO_2$
2	Плотность жидкости при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	2180	1830	774
3	Температура кипения, °С	47,5	4,0	Возгонка -78,5
4	Температура сжижения при 0,518 МПа	-	-	-56,6
5	Давление насыщенного пара, МПа, при 20 °С при -60 °С	0,051 0,001	1,463 0,531	Сжиж. 5,723 Крист. 0,410
6	Температура кристаллизации, °С	-110,5	-160,5	-78,5
7	Критическая температура, °С	214,5	154,0	31,1
8	Критическое давление, МПа	549	430	7,39
9	Плотность пара (газа) при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	10,9	6,9	1,97
10	Удельный объем пара (газа) при 50 °С, м <sup>3</sup> /кг	0,102	0,160	0,509
11	Минимальная огнегасящая концентрация при объемном тушении, % по массе, мг/м <sup>3</sup>	4,5 0,488	7,5 0,518	22 0,433
12	ПДК паров (газа) в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	600	883	30
13	Смертельная концентрация, мг/м <sup>3</sup> , при 15 мин. воздействия (для белых крыс) паров с воздухом продуктов термического (800°С) разложения	1340 17	5075 -	183 -



## ПОЯСНЕНИЕ СОСТАВА, СВОЙСТВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ГСМ, ПРИВЕДЕННЫХ В ТАБЛИЦАХ СПРАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Активные элементы** (кальций, барий и др.) вводятся в состав моющих и антикоррозионных присадок к маслам для поршневых двигателей. Обеспечивают адсорбцию присадки на нерастворимых в масле частицах и создание двойного электрического слоя, препятствующего их коагуляции и выделению загрязнений. Щелочные металлы также нейтрализуют кислоты, образующиеся из продуктов сгорания сернистого топлива.

**Антикоррозионная присадка** добавляется в ГСМ для уменьшения коррозии контактирующих с ними металлов. Обычно образует стойкую защитную пленку на поверхности металла или вступает в реакцию с коррозионно-активными веществами, содержащимися в ГСМ, уменьшая их количество или активность.

**Антиокислительная присадка** (антиоксидант) добавляется в ГСМ для повышения их стабильности при хранении и применении. Тормозит образование смол, кислых коррозионноактивных соединений, выделение осадков, разложение ТЭС.

**Антистатическая присадка** (отечественная – сигбол, зарубежная – ASA-3) добавляется в реактивные топлива для повышения их электропроводимости в целях ускорения релаксации электростатического заряда при наливе заправочных средств и заправке топливом летательных аппаратов. Содержит органические соли хрома. Повышенное содержание присадки в топливе может вызвать искажение показаний топливомеров с индукционными датчиками.

**Ароматические углеводороды**  $C_nH_{2n-6}$ , молекулы которых содержат бензольное кольцо  $C_6$ , склонны к саже- и нагарообразованию, способствуют повышению температурного режима деталей камеры сгорания, гигроскопичности топлива, разрушению соприкасающейся с ним резины. Их содержание (массовая доля) определяется по методике ГОСТ 6994-54 путем взвешивания в делительной воронке исходного количества топлива и его оставшейся части после обработки концентрированной серной кислотой и слива отстоя. По методике ОСТ 38.01277-82 определение производится путем хроматографического разделения топлива в трубке, заполненной мелкопористым подкисленным силикагелем; зона адсорбции ароматических углеводородов самоокрашивается.

**Взаимодействие с водой** проверяется для обнаружения в топливе примесей, способствующих образованию водной эмульсии, смешиваемых с водой или коагулирующих на границе раздела топлива и воды. Залитые в мерный цилиндр 20 мл дистиллированной воды и 80 мл топлива встряхивают в течение 2 мин и после 5 мин отстаивания оценивают эмульгируемость как изменение объема водного слоя (допускается  $\pm 1$  мл) и состояние поверхности раздела фаз (допускаются пузырьки не более чем на половине поверхности, не должно быть пленки, твердых или смолистых частиц).

**Внешний вид** смазок и технических жидкостей (цвет, загрязненность, структура) позволяют убедиться, что не началась их порча в результате увлажнения, загрязнения, окисления, воздействия высоких температур.

Признаком порчи могут быть: неоднородность структуры смазки, появление в ней комков; помутнение, выпадение осадка, расслоение или изменение

цвета жидкости. По внешнему виду можно судить о том, не перепутан ли данный сорт ГСМ с другим, не смешаны ли различные сорта.

**Вода**, содержащаяся в жидком прозрачном топливе в нерастворенном состоянии, определяется визуально. Считается, что вода отсутствует, если топливо, налитое в стеклянный цилиндр диаметром 40-55 мм, прозрачно и не содержит видимой на глаз взвешенной или осевшей на дно воды. Наличие воды в маслах и смазках обнаруживается при их подогреве в пробирке до 150<sup>0</sup>С по характерному потрескиванию и вспениванию. Объемная доля воды в процентах определяется по методике ГОСТ 2477-65 путем отгона ее из смеси топлива, масла или смазки с безводным растворителем.

**Водорастворимые кислоты и щелочи**, активные в отношении коррозии металлов, обнаруживают с помощью индикаторов, которые при соприкосновении с ними меняют цвет.

Желтый в нейтральной среде индикатор метиловый оранжевый приобретает свой характерный цвет при воздействии кислоты. Бесцветный индикатор фенолфталеин становится малиновым в щелочной среде. По методике ГОСТ 6307-75 испытанию подвергается водная вытяжка, полученная путем взбалтывания в делительной воронке нагретых до 50-60<sup>0</sup>С дистиллированной воды и топлива или масла. В делительную воронку берут по 50 мл дистиллированной воды и топлива или масла, а при контроле реактивных топлив – 10 мл воды и 100 мл топлива. 50 г пластичной смазки предварительно расплавляют и кипятят с 50 мл дистиллированной воды.

**Воспламеняемость** дизельного топлива в камере сгорания двигателя оценивается *цетановым числом* (см.) по задержке воспламенения после впрыска. С ее увеличением возрастает жесткость работы дизеля, повышается нагрузка на подшипники, а с уменьшением снижается полнота сгорания и возрастает удельный расход топлива. Чем задержка меньше, тем цетановое число выше.

**Вспениваемость** – см. испытание на вспенивание.

**Высота некопящего пламени** реактивных топлив отражает склонность к саже- и нагарообразованию. По методике ГОСТ 4338-71 определяют высоту пламени при выдвигании фитиля диффузионной горелки до порога появления копоти на его вершине. Чем она больше, тем меньше образование дисперсного углерода при диффузионном горении топлива.

**Вязкость** – внутреннее трение, проявляющееся в сопротивлении сдвигу, которое обусловлено межмолекулярными силами и обменом количества движения между взаимно перемещающимися слоями жидкости. Вязкость существенно зависит от температуры: в рабочем диапазоне температур вязкость топлив изменяется в несколько раз, вязкость масел – в тысячи раз. Поэтому обязательно указание температуры, при которой определяется вязкость. **Динамическая** вязкость (коэффициент внутреннего трения) представляет собой силу сопротивления при перемещении слоев жидкости площадью 1 м<sup>2</sup>, находящихся на расстоянии 1м, с относительной скоростью 1м/с. Выражается в Па·с или Н·с/м<sup>2</sup>. Ранее применявшаяся единица измерения *пуаз* равна 0,1 Па·с. Динамическая вязкость консистентных смазок зависит от скорости деформации, градиент которой определяется одновременно с усилием сдвига в пружинном капиллярном вискозиметре по методике ГОСТ 7153-54. **Кинематическая** вязкость, характе-

ризующая подвижность жидкости, равна отношению динамической вязкости к плотности при той же температуре; ее размерность  $\text{м}^2/\text{с}$ . Ранее применявшаяся единица измерения *стокс* равна  $10^{-4} \text{м}^2/\text{с}$ , то-есть  $1 \text{ см}^2/\text{с}$ , а  $1 \text{ сСт} = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$ . По методике ГОСТ 33-82 кинематическая вязкость определяется путем измерения времени истечения фиксированного объема жидкости через капилляр. Высокая вязкость топлив при отрицательных температурах ухудшает работу топливной аппаратуры – распыл топлива, реакцию гидромеханических устройств автоматики. Чрезмерно высокая вязкость масел затрудняет пуск двигателей при низких температурах, а слишком малая вязкость приводит к просачиванию через зазоры, снижению рабочего давления, нарушению гидродинамического режима смазки. При высоких контактных нагрузках решающее влияние на процесс смазки оказывает не вязкость, а *смазочные свойства* (см.).

**Газовая постоянная** удельная выражает работу, совершаемую 1 кг газа при изменении температуры на 1 К ( $1^\circ\text{C}$ ) при постоянном давлении.

**Давление насыщенных паров** представляет собой давление на стенки сосуда, внутри которого происходит испарение, при достижении равновесия между паром и жидкостью. Характеризует интенсивность испарения топлива и склонность к образованию паро-воздушных пробок в топливной системе. Увеличивается с повышением температуры, а также – для топлив, состоящих из смеси углеводородов – с возрастанием отношения объема, занимаемого жидкостью, к объему, занимаемому парами топлива. По методике ГОСТ 1756-52 определяется в металлическом сосуде с манометром (бомбе Рейда) при  $38^\circ\text{C}$  и отношении объемов жидкой и паровой фаз 1:4.

**Деактиватор металла** – присадка, ослабляющая каталитическое действие металла (главным образом, меди) на окисление ГСМ.

**Детонационная стойкость** характеризует способность топлива сгорать без детонации в поршневом двигателе с искровым зажиганием. Детонация в двигателе – ненормально быстрое сгорание топлива, сопровождаемое возникновением ударных волн. Она вызывает перегрев и постепенное разрушение поверхности деталей, на которую воздействуют ударные волны. Определяется на малоразмерных одноцилиндровых установках путем сравнения с эталонными топливами (за 100 принята детонационная стойкость изооктана). Детонационная стойкость различна при работе двигателя на бедных и богатых составах смеси. На бедной смеси ( $\alpha \approx 1,05$ ) она оценивается *октановым числом* (см.), на богатой ( $\alpha \approx 0,6$ ) – *сортностью* (см.).

**Диаметр пятна износа** – см. смазочные свойства.

**Динамическая вязкость** – см. вязкость.

**Зольность** – массовая доля (%) неорганических веществ, образующих остаток после выпаривания ГСМ и прокаливания неиспарившейся части в открытом тигле по методике ГОСТ 1461-59. Если в ГСМ нет металлосодержащей присадки, повышенная зольность свидетельствует о его загрязнении. **Сульфатная зольность** моторных масел характеризует количество моющей присадки (сульфонатов металлов); ее ограничивают во избежание вредного действия отложений в камере сгорания. **Индекс вязкости (ИВ)** характеризует пологость вязкостно-температурной характеристики масла. Определение ИВ основано на сравнении масла с эталонными по степени изменения вязкости масла в зависи-

мости от его температуры. Эталонное масло с пологой вязкостно-температурной характеристикой имеет ИВ=100, с крутой – ИВ=0. Чем выше ИВ, тем лучше масло, его вязкость меньше меняется при изменении температуры. Практически ИВ находят с помощью таблиц ГОСТ 25371-92 по двум значениям кинематической вязкости масла, взятым для различной температуры.

**Индекс сепарации воды** характеризует отделение воды, эмульгированной в топливе, которое ухудшается при наличии поверхностно-активных веществ, обеспечивающих смазочные свойства топлив. Определяют с помощью сепаратора, в котором готовят, а затем фильтруют эмульсию воды в топливе. Мутность топлива в конце испытания оценивают по шкале нефелометра. Косвенно характеризует смазочные свойства топлива.

**Индукционный период** бензина характеризует его склонность к **смолообразованию**: отложению смол во всасывающей системе двигателя, к окислению и смолообразованию при длительном хранении. По методике ГОСТ 4039-48 определяется время до начала окисления в контакте с кислородом (в бомбе с давлением 0,7 МПа) при 100<sup>0</sup>С.

Индукционный период осадкообразования масла определяется в приборе ДК-3 при 200<sup>0</sup>С под длительным окисляющим воздействием воздуха.

**Испаряемость** масла оценивается по потере массы и повышению вязкости после испытания по методике ГОСТ 20354-74, смазки – по потере массы после испытания по методике ГОСТ 9566-74.

**Испытание на вспенивание** характеризует склонность масла к пенообразованию, затрудняющему циркуляцию масла при работе двигателя. Оценка масла дается по объему пены (в %), оставшейся через 3 мин после вспенивания масла струей пропускаемого через него воздуха по методике ГОСТ 21058-75.

**Испытание на медной пластинке** производится путем погружения ее на 3ч в нагретое до 100<sup>0</sup>С реактивное топливо или нагретое до 50<sup>0</sup>С топливо другого назначения и масло. Испытанием согласно методики ГОСТ 6321-69 проверяется отсутствие свободной серы. При ее наличии пластинка покрывается пятнами или налетом и топливо бракуется. Стандартами на ряд сортов реактивного топлива не допускается никакого изменения цвета пластинки, для топлива РТ допускается равномерный оранжевый оттенок без изменения первоначального блеска. Иностранными спецификациями предусмотрена оценка изменения цвета пластинки в баллах.

**Йодное число** выражается в граммах йода, присоединившегося к 100г топлива (точнее, к содержащимся в нем непредельным углеводородам) при обработке его спиртовым раствором йода по методике ГОСТ 2070-82. Характеризует массовую долю непредельных углеводородов: в реактивных топливах она приблизительно равна 0,7 йодного числа, в бензинах – 0,4 йодного числа.

**Кинематическая вязкость** – см. вязкость.

**Кислотное число** масел и **кислотность** топлив выражает содержание в них органических кислот количеством миллиграммов щелочи – едкого кали, которое их нейтрализует, превращая в соли и мыла. По методике ГОСТ 5985-79 кислоты экстрагируют нейтрализованным этиловым спиртом путем его кипячения в смеси с топливом или маслом. Титрование производят до изменения цвета индикатора нитрозинового желтого в зеленый. Кислотное число выражают в



расчете на 1г масла, кислотность – на 100 мл топлива. Высокое кислотное число свежего масла свидетельствует о недостаточной его очистке при производстве и, возможно, повышенной коррозионной активности, а после окисления при высокой температуре характеризует *термоокислительную стабильность* масла (см.). Кислотность топлива ограничивается по верхнему пределу во избежание коррозии и по нижнему пределу для контроля содержания присадки нефтяных кислот, обеспечивающей *смазочные свойства* топлива (см.).

**Коксуемость** – процент углистого остатка, получившегося после испарения и затем прокаливании неиспарившейся доли масла в приборе, затрудняющем доступ воздуха, по методике ГОСТ 19932-74. В некоторой степени характеризует стабильность масел при высоких температурах.

**Коллоидная стабильность** смазки характеризует ее склонность к выделению жидкого масла при хранении. Ее выражают процентом масла, отпрессованного из смазки в специальном приборе по методике ГОСТ 7142-74.

**Контактирующая газовая среда**, допустимая для гидромасел при резком сжатии и нагреве в полостях амортизационных стоек шасси и гидроаккумуляторов, определяется во избежание образования взрывоопасной смеси.

**Концентрация ...** – см. наименование вещества, концентрация которого определяется.

**Коррозия** пластинок из различных металлов в **масле** оценивается по изменению массы пластинки, выраженной в  $\text{г/м}^2$ , после испытания масла на термоокислительную стабильность (см. в таблицах) или по методикам ГОСТ 2917-76 и ГОСТ 20502-75. Испытание проводится в течение 10-50 ч при температуре  $120^\circ\text{C}$  или выше (установлена для каждого сорта масла) с продувкой воздухом или кислородом. Показателем коррозионных и одновременно предохранительных свойств **смазок** является состояние пластинок из различных металлов, на которые нанесен слой смазки, после испытания по методике ГОСТ 5757-67 при  $100^\circ\text{C}$  в течение заданного времени (3, 24, 72 ч и др.). Смазка считается выдержавшей испытание, если после ее удаления на пластинках не обнаруживается зелень, пятна, точки.

**Коэффициент диффузии** характеризует интенсивность материального потока вещества, проникающего в другое вещество вследствие теплового движения молекул при единичном градиенте концентрации; его размерность  $\text{м}^2/\text{с}$ .

**Критическая нагрузка** – см. смазочные свойства.

**Критические параметры** – при которых исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и паром, находящимися в равновесии, теплота парообразования превращается в ноль, возникают аномалии теплоемкости, теплопроводности, вязкости, флуктуации плотности, опаловая (молочно-мутная) окраска. Равновесие неустойчиво: малейшее снижение температуры вызывает расслоение вещества на фазы, а повышение – переход в газообразное состояние.

**Люминометрическое число** – показатель интенсивности излучения пламени реактивных топлив, основным источником которого является образующаяся при горении сажа. Определяется по методике ГОСТ 17750-72 на диффузионной горелке, оборудованной фотоэлементом и термопарой, путем сравнения с эталонными топливами – слабо излучающим изеооктаном (принят за 100) и интенсивно излучающим тетралином (принят за 0). Топлива с низким



люминометрическим числом могут вызвать перегрев и сокращение срока службы камер сгорания газотурбинных двигателей, усилить дымление.

**Максимальная температура кратковременного применения** пластичной смазки – выше которой происходят необратимые изменения ее структуры, интенсивное испарение масляной основы, разложение или интенсивное окисление какой-либо из составных частей.

**Массовая доля ...** – см. наименование вещества, массовая доля которого определяется

**Меркаптановая сера**  $C_nH_mSH$ , агрессивная в отношении коррозии главным образом кадмия и меди, а также снижающая термостабильность реактивного топлива, определяется по методике ГОСТ 17323-71 путем потенциометрического титрования аммиачным раствором нитрата серебра. Демеркаптанизация является одним из главных технологических процессов, определяющих масштабы выработки реактивных топлив.

**Механическая деструкция** загущающей присадки, содержащейся в некоторых маслах и технических жидкостях, представляет собой их деполимеризацию ("размол") в нагруженных узлах трения – см. стабильность вязкости.

**Механические примеси** контролируют визуально в ярком проходящем свете в топливе, налитом в стеклянный цилиндр диаметром 40-55 мм, не должно содержаться взвешенных или осевших на дно посторонних примесей. В аэродромных условиях рекомендуется просмотр топлива, налитого в прозрачную чистую посуду вместимостью 0,5-1 л из бесцветного стекла, закрытую крышкой, при вращательном движении. При ярком освещении сбоку глаз различает частицы крупнее 25-50 мкм. Если в топливе обнаружены невооруженным глазом единичные частицы, это указывает на недопустимо большое количество более мелких невидимых частиц. Попутно контролируется отсутствие кристаллов льда (взвешенных в топливе снежинок). Наличие механических примесей в масле определяется визуально путем нанесения тонкого слоя масла на чистое стекло и просмотра его на свет, в пластичных смазках на ощупь, перетиранием смазки между пальцами. Количество механических примесей определяют путем фильтрования, высушивания и взвешивания фильтра на аналитических весах. Все вещества, задержанные на фильтре, считаются механическими примесями; выражение их содержания в  $млн^{-1}$  соответствует 0,0001%. Топливо по методике ГОСТ 10577-78 пропускают через мембранный фильтр с порами около 4 мкм. Масла по методике ГОСТ 6370-83 разбавляют бензином или бензолом и пропускают через бумажный фильтр. Пластичные смазки по методике ГОСТ 1036-75 обрабатывают в специальном экстракторе спирто-бензольной смесью и горячей дистиллированной водой и считают механическими примесями не растворившийся остаток.

**Моющие присадки** – сульфонаты металлов и беззольные – обеспечивают чистоту поршней, поршневых колец, гильз цилиндров. Адсорбируются на поверхности образующихся в масле частиц загрязнения, препятствуют их слипанию и осаждению (см. активные элементы).

**Моющие свойства** масла по ПЗВ определяются по внешнему виду лака на боковой поверхности поршня после 2-часового испытания по методике ГОСТ 5726-53 на одноцилиндровой установке, приводимой от электромотора.

Электроподогревом обеспечивается температура масла в картере  $125^{\circ}\text{C}$  и головки цилиндра  $300^{\circ}\text{C}$ . Отсутствию лака соответствует балл 0, сильному загрязнению поршня лаком – балл 6.

**Набухание резины** – увеличение ее объема после длительного контакта с маслом или технической жидкостью, выражаемое в %, характеризует вредное влияние масел и жидкостей на резинотехнические изделия. Если объем резины после испытания уменьшился, это свидетельствует о растворении ее маслом или технической жидкостью.

**Нафтеновые углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$**  – моноциклические углеводороды относительно высокой плотности химически стабильные. Наиболее желательны в составе реактивных топлив.

**Нафталиновые углеводороды** – бициклические ароматические углеводороды гомологического ряда нафталина  $\text{C}_{10}\text{H}_8$ , наиболее склонные к саже- и нагарообразованию при горении реактивного топлива. Определяются методом ультрафиолетовой спектрофотометрии по ГОСТ 17749-72.

**Непредельные углеводороды** – см. олефиновые углеводороды, йодное число.

**Нерастворимые смолы** – см. термическая стабильность топлив.

**Нормальная скорость пламени** – скорость перемещения фронта пламени по нормали к его поверхности в гомогенной топливно-воздушной смеси при стандартных условиях. Зависит от природы топлива и состава смеси с воздухом, обычно указывается максимальное значение по составу смеси.

**Общая сера** в топливе и масле входит почти полностью в состав неактивных сероорганических соединений и поэтому не может рассматриваться в качестве коррозионного агента, действующего на топливную или масляную систему двигателя. Но от ее массовой доли в топливе зависит количество образующегося при сгорании диоксида серы, вызывающего коррозию лопаток турбины и других деталей, соприкасающихся с продуктами сгорания (в поршневых двигателях возможно их проникновение в картер). При этом наличие общей серы оказывает некоторое антиокислительное действие и смазочный эффект. Определяется по методике ГОСТ 19121-73 путем сжигания навески нефтепродукта, поглощения диоксида серы раствором карбоната натрия и *титрования* (см.) соляной кислотой. Допустимое содержание серы в виде коррозионноактивных соединений на 2-3 порядка меньше содержания общей серы, а наличие свободной серы вообще не допускается.

**Октановое число** – показатель детонационной стойкости топлив на бедной смеси ( $\alpha \approx 1,0$ ), равное процентному (по объему) содержанию изооктана в смеси с нормальным гептаном, которая равноценна по детонационной стойкости испытываемому топливу. Определяется на одноцилиндровых установках с переменной степенью сжатия. Детонация оценивается электроакустическим измерителем детонации, который воспринимает действие ударных волн в цилиндре. Состав топливно-воздушной смеси подбирается соответствующим наибольшей склонности к детонации. Испытание по "моторному" методу ГОСТ 511-66 проводится при частоте вращения вала  $900 \text{ мин}^{-1}$  и подогреве топливно-воздушной смеси до  $150^{\circ}\text{C}$ , по "исследовательскому" методу ГОСТ 8226-66 на менее напряженном режиме  $600 \text{ мин}^{-1}$  и без подогрева топли-

во-воздушной смеси, при котором получают более высокие значения октавого числа.

**Олефиновые углеводороды**  $C_nH_{2n}$ , склонные к окислению и смолообразованию, содержатся в топливах и маслах в небольшом количестве. В отечественных топливах их содержание ограничивается нормой на *йодное число* (см.), а в иностранных топливах принимается численно равным бромному числу, определяемому аналогично йодному числу.

**Осадок** – см. *термическая стабильность* топлива, *термоокислительная стабильность* масел.

**Параоксидифениламин**  $NH(C_6H_4OH)_2$ , температура плавления около  $70^{\circ}C$ , - см. *антиокислительная присадка*.

**Парафиновые углеводороды**  $C_nH_{2n-2}$  – ациклической структуры различного изомерного строения, стабильны, входят в состав реактивных топлив.

**Пенетрация** – показатель густоты пластичных смазок, используемый для контроля технологии их производства и сохранения структуры при применении. Определяется по методике ГОСТ 5346-78 при помощи пенетromетра путем погружения в смазку острия конуса под действием собственного веса 150г в течение 5 с, выражается числом десятых долей миллиметра. Чем мягче смазка, тем больше число пенетрации.

**Плотность** представляет собой массу вещества, заключенную в единице его объема. Обычно выражается в  $кг/м^3$ , иногда в г/мл или безразмерной величиной, которая показывает отношение плотности вещества к плотности воды, имеющей температуру  $4^{\circ}C$ . Плотность жидких ГСМ определяют по методике ГОСТ 3900-85 с помощью ареометра, погружаемого в испытуемую жидкость. Плотность топлив влияет на их максимальный бортовой запас и на летно-технические характеристики летательных аппаратов. Плотность масел регламентируется для контроля их состава и технологии производства.

**Поверхностное натяжение** представляет собой работу образования единицы площади поверхности (размерность  $Дж/м^2$ ) или, что эквивалентно, силу сцепления частиц на единицу длины периметра поверхности (размерность Н/с). Резко снижается под действием поверхностно-активных веществ.

**Предел прочности** пластичной смазки характеризует ее способность удерживаться в узлах трения при воздействии центробежных сил, а также собственного веса смазки. По методике ГОСТ 7143-73 определяется при помощи пластометра по давлению, при котором столбик смазки сдвигается.

**Пределы горения** указывают границы состава топливо-воздушной смеси, в которых возможно распространение пламени при стандартных условиях.

**Предельно допустимая концентрация** (ПДК) вредного (загрязняющего) вещества в воздухе рабочей зоны, которая не вызывает у работающих людей при ежедневном вдыхании в пределах 8 ч в течение всего рабочего стажа заболеваний или отклонений в состоянии здоровья.

**Прозрачность** служит показателем чистоты жидкости – отсутствия мелкодисперсных частиц механических примесей, тонкой водной эмульсии, мыла (оставшегося после очистки), продуктов разложения тетраэтилсвинца в бензи-

не, а также показателем совместимости ГСМ разных сортов. См. также – *внешний вид*.

**Противоводокристаллизационные жидкости (ПВКЖ)** этилцеллозольв (жидкость "И") и тетрагидрофурфуриловый спирт (жидкость "ТГФ") препятствуют образованию кристаллов льда в реактивном топливе. Вводятся в состав топлива на аэродромном складе ГСМ в количестве 0,1% при температуре от 0° до –15°С и 0,2% при более низкой температуре, на большинстве военнотранспортных самолетов 0,1% всегда, на некоторых типах самолетов 0,3%. За рубежом на месте производства в реактивные топлива вводится метилцеллозольв (присадка PF-A55B) в количестве 0,15%. Содержание ПВК жидкости определяется бихроматным методом: цвет раствора бихромата калия в смеси с водной вытяжкой и серной кислотой изменяется от оранжево-желтого к светло-зеленому – 0,1%, зеленому – 0,2%, синему – 0,3%.

**Противозадирные свойства** масел и смазок обеспечиваются их химическим воздействием на поверхность смазываемых деталей при тяжелых режимах трения. Чтобы предотвратить схватывание и задир, применяют присадки, содержащие фосфор, серу и хлор: трикрезилфосфат, меркаптобензотиазол, осерненный октол, совол (тетра- и пентахлоридфенил), а также свободную серу (вводится в гипоидное масло).

**Противоизносные присадки** вводятся в состав ГСМ в целях образования граничной смазочной пленки, предотвращающей сухое трение при высоких контактных нагрузках. Они представляют собой поверхностно-активные вещества, полярные молекулы которых адсорбируются на поверхности смазываемых деталей. К их числу относятся нафтеновые и другие органические кислоты, сложные эфиры, кислородсодержащие органические полимеры, органические сульфиды, аминфенолы. Противоизносным действием обладают также противозадирные и некоторые антиокислительные присадки.

**Рабочие температуры** гидравлических жидкостей установлены исходя из характеристик их прокачиваемости при низких температурах и стабильности при высокой температуре.

**Растворимость смазок** характеризует их стойкость против воздействия топлива, масла, воды в процессе применения, а также возможность удаления смазки с помощью растворителя.

**Растворимые смолы** – см. *термостабильность* топлив.

**Самовоспламенение** характеризует пожарную опасность жидкостей при нагреве в отсутствии контакта с пламенем или продуктами сгорания; зависит от химической природы вещества. В дизеле обеспечивает рабочий процесс (см. *воспламеняемость, цетановое число*). Углеводороды с более высокой молекулярной массой имеют более низкую температуру самовоспламенения.

**Свинец** – см. антидетонатор.

**Свободная сера** – см. испытание на медной пластинке.

**Свободные органические кислоты и щелочи** в смазках определяются по методике ГОСТ 6707-76 путем растворения навески смазки в спиртобензиновой смеси, добавления фенолфталеина и титрования 0,1н раствором соляной кислоты или 0,1н спиртовым раствором едкого кали до изменения окраски. При наличии щелочи исходная смесь розовая, кислоты – бесцветная.



**Сероводород**  $H_2S$ , активный в отношении коррозии металлов, в составе ГСМ не допускается. Его отсутствие контролируется по методике ГОСТ 17323-71 путем потенциометрического титрования.

**Сигбол** – см. антистатическая присадка.

**Смазочные свойства** ГСМ обусловлены образованием граничной смазочной пленки, связанной с поверхностью трущихся деталей адсорбционными (электростатическими) силами. Носителями смазочных свойств являются поверхностно-активные вещества, молекулы которых полярны. Смазочные свойства масел оценивают по методике ГОСТ 9490-75 на четырехшариковой машине трения. По результатам серии 10-секундных испытаний определяется **критическая нагрузка**, выше которой происходит резкое усиление износа, что является признаком разрушения смазочной пленки. Противоизносное действие оценивают **диаметром пятна износа** на шарике, полученного при этой нагрузке. Иностранцами спецификациями предусмотрена оценка на шестеренчатой передаче по величине поврежденной поверхности. Косвенная оценка для топлив производится по кислотности, отражающей наличие поверхностно-активных нафтеновых кислот.

**Смертельная концентрация** токсичных веществ в атмосфере определяется по гибели 50% подопытных животных (как правило, белых крыс).

**Совместимость** с одготипным топливом, маслом или технической жидкостью проверяется смешиванием с ними испытуемого образца в соотношении 1:1 при температуре 70-80<sup>0</sup>С и охлаждением до окружающей температуры. ГСМ считаются выдержавшими испытание, если получается совершенно однородный прозрачный раствор без осадка.

**Содержание...** – см. наименование вещества, содержание которого определяется.

**Сортность на богатой смеси** – показатель детонационной стойкости топлива, равный сортности эталонного топлива (изооктана с добавкой тетраэтилсвинца), которое по детонационной стойкости на богатой смеси ( $\alpha \approx 0,6$ ) равноценно испытуемому топливу. Определяется на малоразмерной одноцилиндровой установке, но эталонные топлива протарированы на установке с цилиндром авиационного двигателя. Их сортность установлена как процентное отношение максимальных мощностей при начальной детонации на данном эталоне и на чистом изооктане.

**Стабильность вязкости** загущенных масел оценивается по методике ГОСТ 10497-63 уменьшением кинематической вязкости при 100<sup>0</sup>С после 20 ч испытания на установке с шестеренчатым насосом при давлении 8 МПа и температуре 40<sup>0</sup>С. Для гидромасла АМГ-10 производится обработка ультразвуком 22 кГц в течение 50 мин при 60<sup>0</sup>С.

**Стабильность против окисления** – см. *термоокислительная стабильность* масел. Для смазок определяется по методике ГССТ5734-76 и оценивается по количеству кислот или щелочей, образовавшихся за 10 ч при нагревании до 120<sup>0</sup>С тонкого слоя смазки, нанесенного на медную пластинку – катализатор окисления. Выражается кислотным числом, для щелочей – отрицательным (1% NaOH принимают равным 14 мг KOH).



**Стехиометрический коэффициент** топлива или теоретически необходимое для его сгорания количество воздуха – расчетное отношение масс воздуха и топлива, соответствующее полному окислению горючих элементов.

**Температура вспышки** – наименьшая температура топлива или масла, при которой пары над его поверхностью образуют с воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении пламени. Характеризует испаряемость горючей жидкости, соблюдение технологии производства топлив, масел и технических жидкостей, пожарную опасность топлива и технических жидкостей, наличие примеси топлива в масле. Определяется для синтетических масел и технических жидкостей в открытом тигле по методике ГОСТ 12.1.044-84 или ГОСТ 4333-74, а для нефтяных топлив и масел, как правило, в закрытом тигле по методике ГОСТ 6356-75 (она ниже, чем в открытом тигле).

**Температура застывания** масла, дизельного топлива – при которой оно теряет подвижность. Определяется по методике ГОСТ 20287-74 как максимальная температура, при которой уровень масла или топлива, охлаждаемого в пробирке, при ее наклоне на  $45^\circ$  в течение 1 мин остается неподвижным.

**Температура каплепадения** смазки – при которой из смазки, нагреваемой в специальном приборе по методике ГОСТ 6793-74, выпадает первая капля; характеризует способность смазки удерживаться на смазываемой поверхности при высокой температуре.

**Температура кипения** – при которой давление насыщенного пара, находящегося в равновесии с жидкостью, равно внешнему давлению, и происходит переход нагреваемой жидкости в газообразное состояние. Для индивидуальных веществ характеризует их чистоту; для жидкостей сложного состава – см. *фракционный состав*. Если давление в тройной точке выше атмосферного, то при атмосферном давлении вместо кипения происходит возгонка – переход в газообразное состояние непосредственно из твердого, минуя жидкое (например, диоксид углерода  $\text{CO}_2$  при  $-78,5^\circ\text{C}$ ).

**Температура конца кипения** жидкостей сложного состава – наиболее высокая температура паров в колбе для перегонки, после достижения которой она начинает падать.

**Температура кристаллизации или замерзания** индивидуальных веществ, при которой в охлаждаемой жидкости образуются кристаллы, находящиеся в равновесии с ней; при этой же температуре происходит плавление кристаллов. Табличные данные приведены для стандартного давления.

**Температура начала кипения или перегонки** жидкостей сложного состава (условная) при которой из трубки холодильника при перегонке выпадает первая капля конденсата.

**Температура начала кристаллизации** топлива – наибольшая температура, при которой на глаз обнаруживаются кристаллы углеводородов. По методике ГОСТ 5666-56 топливо охлаждают в пробирке с двойными стенками, периодически осматривая ее в специальном приборе с зеркальным отражением света.

**Температура ожижения** диоксида углерода соответствует *тройной точке* (см.).

**Температура помутнения** топлива – при которой в процессе охлаждения оно мутнеет вследствие выделения микроскопических капелек воды, мик-

рокристаллов льда и углеводов. Методика определения такая же, как температуры начала кристаллизации.

**Температура самовоспламенения** не является константой вещества, она зависит от условий теплоотвода.

**Температурный диапазон применения** (работоспособности) пластичных смазок, обычно не регламентируемый стандартами или техническими условиями, соответствует по нижнему пределу повышению вязкости примерно до 2000 Па·с, пускового крутящего момента до 50 Н·см и установившемуся крутящему моменту 10 Н·см, а по верхнему пределу – приближению к температуре каплепадения, недопустимому синерезису или испарению масляной основы, а также (для высокотемпературных смазок) ускорением термического разложения, окисления и полимеризации.

**Теплоемкость** – количество теплоты, вызывающее изменение температуры на 1 К ( $1^{\circ}\text{C}$ ).

**Теплопроизводительность** топлива (низшая) – тепловой эффект стехиометрического сгорания топлива в расчете на 1 кг продуктов полного сгорания, охлажденных до стандартной температуры 293 К (20  $^{\circ}\text{C}$ ) при сохранении в газообразном состоянии, или на 1 кг стехиометрической топливо-воздушной смеси.

**Теплота испарения** – количество теплоты, поглощаемое при изотермическом переходе жидкости в газообразное состояние.

**Теплота ортопараконверсии** водорода – тепловой эффект собственного молекулярному водороду перехода из ортоформы с параллельным спином обоих протонов в параформу с антипараллельным спином протонов, который происходит при понижении температуры. Нормальный водород при температуре выше 180 К содержит 75% орто- и 25% параводорода, а при температуре жидкого водорода практически полностью переходит в парамодификацию. Достижение равновесия затягивается на много суток, но может быть форсировано катализатором.

**Теплота сгорания удельная низшая** или **теплотворность** топлива – количество теплоты, выделяемое при полном сгорании 1 кг топлива и охлаждении продуктов сгорания до стандартной температуры 293 К (20  $^{\circ}\text{C}$ ) без конденсации паров воды, образовавшейся при сгорании содержащегося в топливе водорода. Практически по методике ГОСТ 12261-75 определяют высшую теплоту сгорания (включающую теплоту конденсации паров воды) путем сжигания 0,5-0,6 г топлива в калориметрической установке в среде сжатого кислорода. Отдельно определяют количество образовавшейся воды, которая поглощается пемзой, пропитанной серной кислотой, и вычитается подсчитанная по нему теплота ее конденсации. Расчетная теплота сгорания реактивного топлива вычисляется по методике ГОСТ 11065-75 по значениям его плотности и анилиновой точки (температурной границы растворения равных объемов анилина и топлива), с помощью эмпирической формулы, учитывающей их связь с элементным и углеводородным составом топлива (анилиновая точка ниже при большем содержании ароматических углеводов в топливе).

**Термическая стабильность** (термостабильность) топлива в статических условиях характеризует его устойчивость к образованию осадков при нагревании в присутствия воздуха. Ее выражают содержанием осадка, а также раство-

римых и нерастворимых в топливе смол, образовавшиеся при окислении жидкого топлива в герметичной колбе при 150<sup>0</sup>С (температуре наибольшей интенсивности осадкообразования) в контакте с бронзовой пластинкой, являющейся катализатором окисления. Реактивные топлива умеренной термостабильности испытывают по методике ГОСТ 9144-79 в течение 4 ч, по методике ГОСТ 11802-66 испытывают термостабильные топлива в течение 5 ч. Методики различаются по устройству аппаратуры и способам отделения осадка.

**Термостабильность топлив динамическим методом**, определяемая в условиях, сходных с условиями их применения на сверхзвуковых самолетах. Оценивается прокачкой топлива в течение 5ч через подогреваемый до 150<sup>0</sup>С трубчатый элемент и подогреваемый до 200<sup>0</sup>С фильтр. Определяют отложения в трубчатом элементе и перепад давления на фильтре в конце испытания. Испытания зарубежных термостабильных топлив проводят при более высокой температуре трубчатого элемента 218<sup>0</sup>С и фильтра 274<sup>0</sup>С.

**Термоокислительная стабильность** масел для ГТД характеризуется концентрацией осадка, кислотным числом и изменением вязкости после окисления в специальном приборе пробулькивающим через масло воздухом или кислородом в контакте с металлическими пластинками или шариками при заданной температуре. По методике ГОСТ 981-75 нефтяные масла подвергаются окислению в течение нескольких часов, по методике ГОСТ 23797-79 испытание синтетических масел проводят этапами по 10 ч в течение нескольких десятков часов. Для масел, применяемых в поршневых двигателях, определяют склонность к лакообразованию и пригоранию поршневых колец по методике ГОСТ 4953-49 (метод Папок). Она оценивается временем, в течение которого надо выдерживать масло при температуре 250<sup>0</sup>С, чтобы образовалась лаковая пленка, способная удерживать прихваченное ею кольцо определенной формы с силой 9,8 Н (1 кг силы).

**Тетраэтилсвинец**  $Pb(C_2H_5)_4$  смешанный с выносителями свинца (галогенопроизводными углеводородов), добавляется в бензины для повышения их детонационной стойкости. Для ограничения отложений оксидов свинца в двигателе, а также токсичности бензинов установлен верхний предел содержания ТЭС, выраженный в г/кг или количеством свинца в г/л бензина (1г свинца соответствует 1,56 г ТЭС). Определяется по методике ГОСТ 13210-72 путем обработки бензина концентрированной соляной кислотой, а затем отделения образовавшегося хлорида свинца при помощи делительной воронки и титрования его раствором индикатора трилона Б до желтого цвета.

**Титрование** – операция определения концентрации раствора, состоящая в постепенном (каплями из протарированной по объему бюретки) введения в точно отмеренный его объем, взаимодействующего с ним рабочего раствора, титр которого (г/мл) точно известен. По эквивалентам и объемам растворов для момента окончания реакции (перехода окраски индикатора) вычисляют количества растворенного вещества.

**Тройная точка** на диаграмме состояния вещества соответствует равновесию трех фаз: твердой, жидкой и газовой (паровой). Ниже соответствующих температуры и давления происходит переход из твердого в газообразное состояние и обратно, минуя жидкое состояние.

**Удельная...** – см. наименование свойства, удельный показатель которого определяется.

**Фактические смолы** – нелетучий остаток после выпаривания топлива под струей воздуха по методике ГОСТ 1567-56 или водяного пара по методике ГОСТ 8489-58. Большая часть смол образуется в процессе выпаривания, поэтому фактические смолы не являются показателем их содержания в топливе до испытания, а являются условной оценкой склонности топлива к смолообразованию при применении в двигателе.

**Фракционный состав** показывает пределы температур выкипания углеводородных фракций, составляющих нефтяное топливо. По методике ГОСТ 2177-82 испытание состоит в перегонке 100 мл топлива и измерении температур начала кипения и выкипания (перегонки) определенных количеств топлива: 10, 50, 90, 96, 97,5 (или 98) % его объема. Характеризует соблюдение технологии производства топлив. На эксплуатационные свойства бензинов влияет решающим образом, дизельных топлив – в меньшей мере, реактивных – не существенно.

**Хладоресурс** – количество поглощаемой топливом тепловой энергии при его нагреве от температуры кипения или стандартной температуры до температуры подачи в камеру сгорания, которое может быть использовано в теплообменных устройствах для охлаждения элементов конструкции, рабочего тела и других целей. Включает теплоту парообразования, а для водорода – теплоту параортоконверсии. При сжигании топлива использованный хладоресурс суммируется с тепловым эффектом сгорания.

**Цетановое число** – показатель воспламеняемости дизельного топлива, равный процентному (по объему) содержанию цетана (нормального гексадекана) в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином, которая имеет равную с испытуемым топливом стандартную задержку воспламенения. Определяется на одноцилиндровой установке с переменной степенью сжатия. Задержка воспламенения регистрируется по совпадению вспышек неоновых ламп индикаторного устройства.

**Цвет** топлив и технических жидкостей, содержащий искусственно введенный краситель, позволяет различать по внешнему виду их сорта. Цвет масел является одним из способов контроля правильности технологии их производства. Иногда цвет позволяет обнаружить некондиционность ГСМ. В войсковых лабораториях цвет определяют обычно на глаз, в стационарных лабораториях – с помощью колориметра по методике ГОСТ 2667-82 путем подбора светофильтра, цвет которого совпадает с цветом исследуемых ГСМ.

**Шуга** водородная – взвесь твердого водорода (в виде частиц поперечником до 3-5 мм) в жидком водороде, плотность которого при температуре кристаллизации существенно выше, чем жидкого кипящего водорода, а потери от испарения существенно меньше.

**Щелочи водорастворимые** – см. водорастворимые кислоты и щелочи.

**Щелочи свободные** – см. свободные кислоты и щелочи.

**Щелочное число** характеризует наличие антикоррозионных присадок в масле, нейтрализующих образующиеся при работе кислые продукты. Выражается количеством миллиграммов едкого кали, эквивалентным количеству соляной кислоты, которое нейтрализует все основные соединения, содержащиеся в 1 г масла.

**Электропроводимость** топлива влияет на скорость рассеивания электростатического заряда, возникающего в топливе при фильтрации, наливе заправочных средств, заправке летательных аппаратов и т. п. Удельная электропроводимость определяют по методике ГОСТ 25950-83: при напряжении 4 В, подводимом к электродам измерительной ячейки с известной электрической емкостью, тераомметром измеряют сопротивление, по которому рассчитывают электропроводимость. Она зависит, главным образом, от содержания в топливе гетероорганических примесей, молекулы которых полярны или легко диссоциируют на ионы. Поэтому термостабильные топлива, очищенные от таких примесей, накапливают электростатический заряд и представляют источник повышенной пожарной опасности. Для повышения электропроводимости в некоторые сорта реактивного топлива вводят *антистатические присадки* (см.). Единица электропроводимости пикосименс на метр (пСм/м) соответствует  $10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиация: энциклопедия / Гл. ред. Г.П. Свищев. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 736 с.
2. Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.Т., Малышев В.В., Орлов В.Н. Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации. М.: Московский рабочий, 2001. – 224с.
3. Бакиров Ф.Т., Захаров В.М. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989. – С.10-13, 36.
4. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия, 1967. – 326с.
5. Бродянский В.М., Фратшер В, Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288с.
6. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд./ Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М.: Химия, 1989. – 672с.
7. Горенков А.Ф., Слифанова Т.А., Ключко И.Г. Влияние фракционного состава на качество реактивных топлив // Химия и технология топлив и масел. 1985, №8. – с. 37-39
8. Гуреев А.А., Фукс И.Г., Лашхи В.Л. Химмотология. М.: Химия, 1986. – 368с.
9. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Шеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. М.: Химия, 1981. – 272с.
10. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М.: Наука, 1984. – 374с.
11. Исаев А.В., Шишаев С.В., Яковлев А.В. Образование и газификация дисперсного углерода в дизельном двигателе. Математическое моделирование процессов // Химия и технология топлив и масел. – 2002, №5. – С. 26-29.
12. Курзинер Р.И. Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей. – М.: Машиностроение, 1989. – 264с.
13. Кутахов В.П., Резников М.Е. Перспективы применения криогенных топлив в летательных аппаратах // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. – 2000, №1. – С.3-6.
14. Лашхи В.Л. Роль смазочного масла в снижении трения и износа // Химия и технология топлив и масел. – 1988, №2. – С. 21-24.
15. Майзель Ю.М., Петров В.Н., Резников М.Е., Старостенко Г.К. Химия и авиационные горючие и смазочные материалы. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1988. – 354с.
16. Мещерякова Т.П. Проектирование систем защиты самолетов и вертолетов. М.: Машиностроение, 1977. – С.187-191, 208-214.
17. Нечаев Ю.Н. Силовые установки гиперзвуковых и воздушно-космических летательных аппаратов. М.: Академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 1996.
18. Нечаев Ю.Н. Термодинамический анализ рабочего процесса пульсирующих детонационных двигателей. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2002. – 52с.

19. Папок К.К., Рагозин Н.А. Технический словарь-справочник по топливу и маслам. М.: Гостоптехиздат, 1963. – 768с.
20. Папок К.К. Химмотология и трибология // Химия и технология топлив и масел. – 1970, №6. – С.1-5.
21. Папок К.К. Химмотология топлив и смазочных масел. М.: Воениздат, 1980. – 192с.
22. Пономаренко В.К. Ракетные топлива. СПб.: Военная инженерно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 1995. – 619с.
23. Пышинов В.С. О расходовании топлива в полете // Вестник воздушного флота. – 1959, №10, №11; 1960, №1.
24. Резников В.Д. Основы разработки дизельных масел // Химия и технология топлив и масел. – 1990, №7. – С.17-23.
25. Резников М.Е., Старостенко Г.К. Химия и авиационные горючие и смазочные материалы. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1977. – 300с.
26. Самойлов Л.П., Нестеров В.М. Использование криогенных топлив в современной ракетно-космической технике России // Применение криогенных топлив в перспективных летательных аппаратах. Сборник докладов VI научно-технической конференции. – М.: ВАТУ, 2002. – С.21-27.
27. Средства аэродромного обеспечения. Справочное пособие. М.: Воениздат, 1980. – с.
28. Теоретические основы химмотологии / Под ред. А.А. Браткова. М.: Химия, 1985. – 320с.
29. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справ. изд. / Под ред. В.М. Школьников. М.: Химия, 1989. – 432с.
30. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник / Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. – М.: Химия, 1985. – 240с.
31. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 944с., с. 151-152.
32. Химический энциклопедический словарь / Гл. ред. И.Л. Кнунянц. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 792с.
33. Химмотология в гражданской авиации: Справочник / Пискунов В.А., Зрелов В.Н., Василенко В. Т., и др. – М.: Транспорт, 1983. – 248с.
34. Химмотология: вчера, сегодня, завтра // Химия и технология топлив и масел, 1998, №5. С.3-4
35. Шкадов Л.М., Глушков Н.Н., Кажан В.Г. и др. Возможные концепции гиперзвукового пассажирского самолета. Техника вождущего флота, № 4-6, 1994.
36. Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.Н., Иванов В.Ф. Экология легких моторных топлив. Казань: Казанский научный центр РАН, 1996. – 204с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	
Глава 1. Введение в авиационную химмотологию.....	
1.1. Предмет и задачи химмотологии.....	
1.2. Авиационная химмотологическая система.....	
1.3. Роль физико-химических процессов и явлений во взаимодействии звеньев химмотологической системы.....	
1.4. Химмотологические испытания.....	
Глава 2. Горение топлив.....	
2.1. Основные особенности процессов горения.....	
2.2. Энергетика горения.....	
2.3. Воспламенение и распространение пламени.....	
2.4. Сажеобразование.....	
2.5. Детонация.....	
2.6. Обеспечение взрывопожаробезопасности.....	
Глава 3. Топлива ГТД (реактивные топлива).....	
3.1. Назначение и классификация реактивных топлив.....	
3.2. Топливо как источник импульса тяги.....	
3.3. Условия применения реактивного топлива и требования к нему.....	
3.4. Стандартные сорта реактивных топлив.....	
3.5. Специальные топлива крылатых ракет.....	
3.6. Свойства топлив, влияющие на летно-технические характеристики ЛА	
3.7. Эксплуатационные свойства топлив, которые проявляются в топливных системах ЛА и топливной аппаратуре ГТД.....	
3.8. Эксплуатационные свойства топлив, которые проявляются при сжигании в ГТД.....	
3.9. Свойства топлив, которые проявляются при их хранении и обслуживании полетов.....	
3.10. Особенности испытаний реактивных топлив.....	
Глава 4. Криогенные топлива перспективных силовых установок.....	
4.1. Физическая природа криотоплив.....	
4.2. Ресурсы, экономические и экологические преимущества криотоплив...	
4.3. Использование криогенных топлив для повышения показателей авиа- ционной.....	
4.4. Инфраструктура криогенного топливообеспечения.....	
4.5. Перспективы создания криогенной авиационной и космической техники.....	
Глава 5. Ракетные топлива.....	
5.1. Главные особенности ракетных топлив.....	
5.2. Тяговая эффективность ракетных топлив.....	
5.3. Жидкие ракетные топлива.....	
5.4. Твердые ракетные топлива.....	
5.5. Техника безопасности.....	
Глава 6. Трение и износ.....	
6.1. Физико-химические процессы в узлах трения.....	
6.2. Изнашивание и износ.....	
6.3. Граничная смазка.....	
6.4. Противозадирное действие.....	
6.5. Гидродинамическая смазка.....	

<b>Глава 7.</b>	<b>Смазочные масла авиационных ГТД.....</b>
7.1.	Назначение и классификация смазочных масел.....
7.2.	Антифрикционное действие смазочных масел в условиях работы ГТД..
7.3.	Условия применения в ГТД и требования к маслам.....
7.4.	Стандартные сорта масел ТРД.....
7.5.	Стандартные сорта масел ГТУ вертолетов.....
7.6.	Стандартные сорта масел ТВД самолетов.....
7.7.	Перспективные смазочные материалы ГТД.....
7.8.	Эксплуатационные свойства масел, которые ограничивают работоспособность авиационных силовых установок.....
7.9.	Свойства масел, которые проявляются при их хранении и обслуживании полетов.....
7.10.	Особенности испытаний смазочных масел ГТД.....
<b>Глава 8.</b>	<b>Топлива и масла поршневых двигателей.....</b>
8.1.	Бензины.....
8.2.	Дизельные топлива.....
8.3.	Смазочные масла авиационных поршневых двигателей.....
8.4.	Моторные масла наземной техники.....
<b>Глава 9.</b>	<b>Технические масла и пластичные смазки.....</b>
9.1.	Трансмиссионные масла.....
9.2.	Масла умеренно нагруженных узлов трения.....
9.3.	Приборные масла.....
9.4.	Состав и структурно-механические свойства пластичных смазок.....
9.5.	Пластичные смазки, применяемые на авиационной технике.....
9.6.	Пластичные смазки наземной техники, обслуживающей полеты.....
<b>Глава 10.</b>	<b>Технические жидкости.....</b>
10.1.	Рабочие жидкости гидроустройств.....
10.2.	Антиобледенительные жидкости.....
10.3.	Охлаждающие жидкости .....
10.4.	Огнегасительные составы .....
<b>Глава 11.</b>	<b>Обеспечение и контроль качества ГСМ.....</b>
11.1.	Стандартизация качества и сертификация ГСМ.....
11.2.	Порядок принятия авиационных ГСМ на снабжение и изменения номенклатуры применяемых ГСМ.....
11.3.	Система контроля качества ГСМ.....
11.4.	Технические средства обеспечения качества ГСМ на аэродроме.....
11.5.	Технология подготовки и заправки ГСМ.....
11.6.	Документация по качеству и расходу ГСМ.....
11.7.	Расследование авиационных происшествий и отказов авиационной техники, связанных с применением ГСМ.....
11.8.	Использование иностранных ГСМ.....
<b>Справочные материалы.....</b>	
	Топлива (1-6 таблицы).....
	Масла (7-10 таблицы).....
	Пластичные смазки (11-12 таблицы) .....
	Технические жидкости (13-15 таблицы).....
	Пояснение состава, свойств и показателей качества ГСМ, приведенных в таблицах справочных материалов .....
	Список литературы .....

## ПОДРИСУНОЧНЫЕ ПОДПИСИ К КНИГЕ "АВИАЦИОННЫЕ ТОПЛИВА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ"

на 5 страницах

Рис. 1.1. Зависимость функционирования боевого авиационного комплекса от факторов, связанных с ГСМ. Звездочкой помечены химмотологические факторы

Рис. 1.2. Трехзвенная авиационная химмотологическая система.  $\Sigma$  - химмотологические явления и процессы, определяемые совместным влиянием звеньев системы и оказывающие на них воздействие

Рис. 2.1. Устройство калориметра

Рис. 2.2. Схема расчета теплоты сгорания по теплоте образования топлив и продуктов сгорания из атомов и из простых веществ

Рис. 2.3. Влияние состава смеси  $\alpha$  на количество тепла, выделяемое в расчете на 1 кг топлива  $H_\alpha$ , на 1 кг продуктов сгорания  $h_\alpha$ , на температуру  $T_r$  продуктов сгорания

Рис. 2.4. Условия теплового взрыва, определяемые тепловыделением  $+q$  и теплоотводом  $-q$  в зоне самовоспламенения при различной (температуре окружающей среды)  $T_0$ ,  $T$  – температура газа в процессе реакции

Рис. 2.5. Схема нормального горения:  $q$  – тепловой поток;  $u_n$  – нормальная скорость горения;  $T_0$ ,  $T_{np}$ ,  $T_r$  – температура исходная (свежей смеси), начала реакции, продуктов сгорания;  $p$  – давление;  $\rho_0$ ,  $\rho_r$  – плотность свежей смеси, продуктов сгорания;  $C_0$ ,  $C$  – концентрация горючего газа в свежей смеси, в зоне реакции;  $\delta_n$ ,  $\delta_r$  – толщина зоны прогрева, зоны реакции

Рис. 2.6. Нормальная скорость пламени различных топлив: сверху вниз – водород, ацетилен, этилен, пропан, метан, пары бензина и керосина

Рис. 2.7. Соотношение между скоростью искривленного фронта ламинарного пламени  $v_r$  в горизонтальной трубе и нормальной скоростью горения  $u_n$

Рис. 2.8. Схема диффузионного горения:  $C_n H_m$ ,  $O_2$ ,  $C_r$  – концентрация топлива, кислорода, продуктов сгорания,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха (исходный и по составу продуктов сгорания); индексы см. рис 2.5

Рис. 2.9. Три фазы химического превращения углеводородного топлива  $C_n H_m$  в диффузионном пламени

Рис. 2.10. Углеродные кристаллиты в частице сажи

Рис. 2.11. Схема расположения атомов углерода в углеродном скелете молекул: первичного  $C^I$ , вторичного  $C^{II}$ , входящего в ароматическое (бензольное) кольцо  $C^A$ , третичного  $C^{III}$ , четвертичного  $C^{IV}$

Рис. 2.12. Изменение состава и состояния вещества при детонации:  $C$  – концентрация,  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $\rho$  – плотность,  $D$  – скорость детонационной волны,  $W$  – скорость газового потока за волной,  $\tau$  – время; индексы см. рис 2.5

Рис. 3.1. Классификация реактивных топлив

Рис. 3.2. Влияние свойств реактивного топлива на состояние, работу и показатели авиационной техники

Рис. 3.3. Взаимная связь требований к качеству реактивного топлива ТС-1 (из смеси западносибирских нефтей). Нормы ТС-1 высшей категории качества



выделены штриховой линией, первой категории – точками, для климатической зоны 1<sub>1</sub> – штрих-пунктиром [7]

Рис. 3.4. Диапазон выкипания и пределы плотности реактивных топлив. Отштрихованы нормы, регламентированные по ГОСТ

Рис. 3.5. Влияние плотности топлива на максимальную дальность полета самолета: *a* – при неизменной массе полезной нагрузки  $m_n = \text{const}$ , *b* – при одинаковой стартовой массе  $m_o = \text{const}$  (за 100% принимается дальность полета при плотности топлива 800 кг/м<sup>3</sup>,  $V_T$  – емкость топливных баков,  $m_o^{-T}$  – масса до заправки топливом)

Рис. 3.6. Влияние теплотворности и других факторов, от которых зависит к.п.д., на потребное количество топлива для полета по одной и той же программе: *a* – при неизменной массе полезной нагрузки  $m_n = \text{const}$ , *b* – при одинаковой стартовой массе  $m_o = \text{const}$  (за 100% принимается любое исходное значение теплотворности)

Рис. 3.7. Объем воздуха (в % к объему топлива), выделяемого из топлива при наборе высоты, если растворимость воздуха в топливе составляет 15% по объему:  $V_{\text{неп}}$  – при непрерывном выделении в ходе подъема,  $V_{\text{вск}}$  – при заповздавшем "вскипании" на высоте,  $V_{\text{пр}}$  – приведенный к стандартному давлению у земли 0,1013 МПа

Рис. 3.8. Влияние температуры топлива на давление насыщенного пара (справа – высота полета, на которой топливо в баках закипает при открытом дренаже  $p_{\text{изб}} = 0$  и при наддуве баков)

Рис. 3.9. Растворимость воды в одной тонне топлива при различной температуре (при влажности воздуха 100%)

Рис. 3.10. Влияние температуры на термостабильность некоторых топлив

Рис. 3.11. Адсорбция полярных молекул содержащихся в топливе присадок и присадок на поверхности металла

Рис. 3.12. Организация рабочего процесса в камере сгорания ГТД

Рис. 3.13. Зависимость максимальной энергетической плотности лучистого потока сажевого аэрозоля от температуры

Рис. 3.14. Энергия излучения факела  $E$  и нагрев стенок жаровой трубы  $t_{\text{ст}}$  в рабочем диапазоне давлений  $p_K^*$  в камере сгорания: 1 – толуол (с выходом на режим "черного" излучения на участке 1а), 2 – топливо Т-6, 3 – топливо ТС-1, 4 – изооктан

Рис. 4.1. Диаграмма состояния параводорода и метана

Рис. 4.2. Примеры включения в схему ГТД устройств, повышающих степень использования эксергии криотоплива

Рис. 4.3. Сравнение жидкого метана и жидкого водорода с авиакеросином по теплотворности  $H_u$ , по стехиометрическому коэффициенту  $L_o$ , по удельному импульсу  $J_{уд}$ , по удельному расходу топлива  $C_{уд}$  (показатели керосина приняты за единицу), пунктир – при использовании эксергетических свойств криотоплив.

Рис. 4.4. Интегральный импульс двухтопливного ЛА при изменении объемного соотношения топлив  $K_v$ :  $\bar{\rho}$  – приведенная (условная) плотность двухкомпонентного топлива,  $\xi_T$  – постоянная массовая доля топлива в стартовой массе  $m_o$ ,  $V_T$  – постоянный максимальный объем топливных баков

Рис. 4.5. Возможные схемы размещения криогенных баков самолетов ближайшего будущего [2]

Рис. 4.6. Проект самолета Ту-206 (Ту-204К) [2]

Рис. 4.7. Многоцелевая авиационно-космическая система: самолет-носитель "Мрия" с выносным топливным баком и орбитальным самолетом [17]

Рис. 4.8. Предполагаемый облик одноступенчатого воздушно-космического самолета [35]

Рис. 4.9. Схема пароводородного ракетно-турбинного двигателя: 1 - газогенератор, 2 - компрессор, 3 - пароводородная турбина, 4 - стабилизатор, 5 - теплообменник подогрева водорода, 6 - насос жидкого водорода, 7 - камера сгорания, 8 - сопло [12]

Рис. 4.10. Гиперзвуковой криогенный воздушно-реактивный двигатель, работающий на метане: ВЗ - воздухозаборник, ТД - турбодетандер, ТНА - турбонасосный агрегат, ТО - теплообменники, КНД - компрессор низкого давления, КВД - компрессор высокого давления, РРТ - регулятор-распределитель топлива, АТ - автономная турбина, ГТ - газовая турбина, РС - реактивное сопло

Рис. 4.11. Многоразовая всеазимутальная ракета-носитель: 1 - полезный груз, 2 - многоразовая первая ступень (метан-кислородная), 3 - вторая ступень одноразового использования (водород-кислородная), 4 - твердотопливные ускорители [26]

Рис. 5.1. Влияние плотности топлива  $\rho_t$  на его несущую способность - полезную нагрузку  $m_n$ , отнесенную к массе топлива  $m_t$  (сплошные линии) и к объему топлива  $V_t$  (пунктир) при двух значениях  $J_{уд}$  [22]

Рис. 5.2. Влияние свойств жидкого ракетного топлива на рабочий процесс, эксплуатационную надежность и показатели ракетной техники

Рис. 5.3. Свойства растворов азотная кислота  $\text{HNO}_3$  + азотный тетроксид  $\text{N}_2\text{O}_4$ :  $\rho$  - плотность при  $20^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{кип}}$  - температура кипения при давлении 0,1013 МПа,  $t_{\text{крист}}$  - температура замерзания (начала кристаллизации)

Рис. 5.4. Расчетные характеристики топлива жидкий кислород + жидкий водород по составу смеси  $\alpha$ :  $J_{уд}$  - удельный импульс;  $V_{\text{газ}}$  - газообразование (при нормальных условиях);  $t_r$  - температура продуктов сгорания,  $\mu$  - их молекулярная масса и  $k$  - показатель адиабаты

Рис. 5.5. Форма сечения профилированного канала топливного заряда РДТТ, обеспечивающая постоянную площадь поверхности горения. На периферии - сечение легких продольных стержней, предотвращающих образование остатков топлива к моменту выключения двигателя

Рис. 5.6. Расчетные характеристики смесового твердого топлива (перхлорат аммония + полиэфир в различном соотношении): обозначения те же, что на рис. 5.4. Сверху показано влияние добавки алюминия на удельный импульс.

Рис. 6.1. Явления в зоне единичной микронеровности при трении: *вверху* - принципиальная схема; *а* - внешнее трение при отсутствии смазки или недостаточной смазки; *б* - внешнее трение с упругим контактированием при граничной смазке; *в* - внутреннее (жидкостное) трение в слое смазки без контакта поверхностей

Рис. 6.2. Режимы смазки узлов трения: I - граничный, II - эластогидродинамический, III гидродинамический [14] (обозначения см. 6.5.1-6.5.2.)

Рис. 6.3. Требования к вязкостно-температурным свойствам масел

Рис. 6.4. Узел трения четырехшариковой машины

Рис. 6.5. Диаграмма износа, получаемая на четырехшариковой машине

Рис. 6.6. Зависимость износа от времени наработки трибосистемы: I – приработка, II – установившийся режим, III – превышение допустимого износа, завершаемое разрушением

Рис. 7.1. Система смазки ГТД, влияние показателей качества масел на работу ГТД и последствия неудовлетворительного качества масел

Рис. 7.2. Вязкостно-температурные характеристики смазочных масел авиационных ГТД

Рис. 7.3. Вязкостно-температурные характеристики натурального нефтяного масла, загущенного масла равной вязкости при основной рабочей температуре и его маловязкой основы (принципиальная схема)

Рис. 7.4. Характер изменения некоторых показателей стабильности масел при работе двигателя ( по состоянию перед очередными доливками)

Рис. 8.1. Детонационные характеристики бензина Б-91/115 при различной температуре воздуха на входе в цилиндр двигателя АШ-82ФН ( в скобках – на входе в двигатель):  $p_K^*$  – давление наддува, соответствующее началу детонации,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха

Рис. 8.2. Детонационные характеристики ( $\beta$  – угол опережения зажигания, соответствующий началу детонации,  $n$  – частота вращения) двух автомобильных бензинов с одинаковым октановым числом по "моторному" методу: А – "малочувствительного" крекинг-бензина с более высоким октановым числом по "исследовательскому" методу, Б – "чувствительного" бензина прямой перегонки

Рис. 8.3. Детонационные характеристики автобензинов по частоте вращения и характеристики эталонных топлив, определяющие разницу в октановых числах по "моторному" и по "исследовательскому" методам (принципиальная схема):  $\epsilon$  – степень сжатия, соответствующая "стандартной" детонации

Рис. 8.4. Изменение давления в цилиндре дизеля по углу поворота коленчатого вала:  $\beta$  – угол задержки самовоспламенения,  $a$  – сжатие и расширение чистого воздуха, б – сгорание, в – расширение продуктов сгорания, 1 – начало впрыска топлива, 2 – самовоспламенение, 3 – начало плавного сгорания, 4 – конец впрыска и сгорания топлива

Рис. 8.5. Вязкостно-температурные характеристики дизельных топлив. Штриховкой выделен рабочий диапазон вязкости

Рис. 9.1. Микроструктура смазки ЦИАТИМ-201 ( $\times 10^4$ ): а – после "отдыха" до механического воздействия; б – после интенсивного механического воздействия (2ч по 400 ударов в мин)

Рис. 9.2. К определению структурно-механических свойств пластичных смазок

Рис. 10.1 Условия работы и свойства гидромасла, влияющие на эксплуатационную надежность гидросистемы

Рис. 10.2. Вязкостно-температурная характеристика гидромасла АМГ-10: 1 – эффект загущения керосиновой фракции виниполом, 2 – допустимый эффект деструкции ("размола") винипола, МВП – характеристика натурального нефтяного масла МВП (для сравнения с АМГ-10)

Рис. 10.3. Плотность  $\rho$  и температура замерзания  $t_{\text{зам}}$  спирто-водных растворов;  $-\Delta V\%$  – уменьшение объема при смешении (в литрах на суммарные 100л спирта и воды до смешения)

Рис. 10.4. Температура замерзания гликоле-водной смеси (точки 40 и 65 соответствуют исходным составам охлаждающих жидкостей)

Рис. 11.1 Объем и последовательность контроля качества реактивного топлива от выдачи предприятием-изготовителем до топливной системы самолета

Рис. 11.2. Типичные стадии загрязнения и очистки реактивного топлива в аэродромных условиях средней климатической полосы: количество механических примесей в 1т топлива, их распределение по источникам загрязнений и степень очистки

Рис. 11.3. Примерная схема фильтрации реактивного топлива

Рис. 11.4. Схема оборудования пункта выдачи масла